



Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan
korkeakoulu

Antti Kajaste

**LENTOLIIKENTEEN MERKITYS KOKO LIIKENNESEKTORIN
PÄÄSTÖVÄHENNYKSIÄ AJATELLEN**

Kemian, bio- ja materiaalitekniikan maisteriohjelma

Pääaine: Prosessitekniikka

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 4.1.2019.

Valvoja

Professori Ari Koskinen

Ohjaaja

Pekka Joensuu

Tekijä Antti Kajaste		
Työn nimi Lentoliikenteen merkitys koko liikennesektorin päästövähennyksiä ajatellen		
Koulutusohjelma Chemical Engineering		
Pääaine Prosessitekniikka		
Työn valvoja Ari Koskinen		
Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t) Pekka Joensuu		
Päivämäärä 04.01.2019	Sivumäärä 75	Kieli suomi

Tiivistelmä

Diplomityön tarkoituksena oli selvittää missä määrin lentoliikenteen polttoaineen kysyntä ohjaa raakaöljyn jalostuksen määrää tilanteessa, jossa bensiinin ja dieselin kysyntä on merkittävästi vähentynyt esimerkiksi sähköautojen yleistymisen myötä. Työssä tutkittiin, kuinka paljon raaka-aineita on saatavilla biopolttoaineiden valmistusta varten, voidaanko kerosiinia valmistaa enemmän samasta tai pienemmästä määrästä raakaöljyä ja voidaanko bensiiniä ja dieseliä käyttää jotenkin muuten kuin energiaksi polttamalla.

Tulosten perusteella näyttää siltä, että lähitulevaisuudessa raaka-aineita ei ole tarpeeksi saatavilla niin laajamittaiseen biopolttoaineiden tuotantoon, että niillä voitaisiin korvata valtaosaa lentokerosiinista. Kerosiinin osuutta raakaöljyn jalostustuotteista voidaan nostaa, mutta tämän tutkimuksen puitteissa on mahdoton sanoa, kuinka isoksi osuus on mahdollista/kannattavaa nostaa. Yksi mahdollinen käyttökohde jalostuksessa ylijääneille bensiinille, dieselille ja muille jakeille on valmistaa niistä vetyä, mutta parempiakin lähteitä vedynvalmistukseen löytyy. Vetyä voisi käyttää vetyautojen polttoaineena tai energian varastointiin kysynnän vaihteluiden tasaamiseen.

Avainsanat lentoliikenne, öljynjalostus, biopolttoaine, kerosiini

Author Antti Kajaste

Title of thesis The Significance of Air Traffic Regarding Emission Reductions in the Whole Transport Sector

Degree Programme Chemical Engineering

Major Chemical Engineering

Thesis supervisor Ari Koskinen

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) Pekka Joensuu

Date 04.01.2019**Number of pages** 75**Language** Finnish

Abstract

The purpose of the master's thesis was to find out how much the amount of crude oil refined is controlled by the demand of jet fuel in a situation, where the demands of gasoline and diesel were significantly reduced due to for example electric cars becoming more common. In the thesis it was studied how much raw material is available for the manufacturing of biofuels, whether more jet fuel can be produced from the same or a smaller amount of crude oil and whether gasoline and diesel can be used in other ways than to burn them to produce energy.

It appears that in the near future there will not be sufficient raw materials available to produce enough biofuels to replace a majority of jet fuel demand. Jet fuel's portion of the products of crude oil refining can be raised, but in this thesis' scope it can't be specified to what level it can be possibly/feasibly raised. One possible use for the remaining gasoline, diesel and other fractions would be to produce hydrogen from them, although better sources for that exist. Hydrogen could be used as fuel for hydrogen cars or energy storage to even out fluctuations in energy demand.

Keywords air traffic, oil refining, bio fuel, jet fuel

Sisällysluettelo

1.	Johdanto	1
1.1.	Tutkimuksen tausta.....	1
1.1.1.	Biopohjaisten lentopolttoaineiden valmistus	8
1.1.2.	Biopolttoaineiden raaka-aineiden saatavuus muualla maailmassa.....	13
1.1.3.	Biopolttoaineiden tuotantokapasiteetti Suomessa	18
1.1.4.	Öljynjalostuksen vähenemisen muut vaikutukset	22
1.2.	Tutkimusongelmat	28
1.3.	Tutkimuksen tavoite.....	28
2.	Kerosiinin saannon parantaminen öljynjalostuksessa	30
2.1.	Raakaöljy, sen rakenne ja eri lajikkeet	30
2.2.	Kerosiinin valmistus raakaöljystä	32
2.2.1.	Raakaöljystä saatavat tuotteet.....	32
2.2.2.	Öljynjalostus	34
2.3.	Polttoaineet lentoliikenteessä	37
2.4.	Kerosiinin saannon parantaminen jalostuksessa	37
2.4.1.	Delta Air Lines ja Trainerin jalostamo	40
2.4.2.	Vetykrakkeriyksikön optimointi simuloimalla	44
2.4.3.	Keskitisleiden jalostus muiksi tuotteiksi.....	46
2.4.4.	Pohjaöljyn kierrätyksen merkitys saannolle.....	48
3.	Vaihtoehtoiset käyttökohteet bensiinille ja muille jakeille.....	51
3.1.	Mahdolliset käyttökohteet.....	51

3.2. Vedyn tuotanto	52
4. Johtopäätökset ja suositukset jatkotutkimukselle	54
Lähteet	56

LIITTEET

- Liite 1 Kaavio raaka-aineista ja niistä saatavista biopolttoaineista
- Liite 2 Kineettinen malli artikkelista Modeling and optimization of an industrial hydrocracking unit
- Liite 3 Tulokset artikkelista Modeling and optimization of an industrial hydrocracking unit
- Liite 4 Tarkemmat vaatimukset Jet A-1 -tyyppiselle lentokerosiinille eri maissa

Lyhenteet

ACARE Advisory Council for Aeronautics Research in Europe

ASTM American Society for Testing and Materials

ATJ alcohol to jet

bpd barrels per day (tynnyriä päivässä)

CORSIA carbon offsetting and reduction scheme for international aviation

DSHC direct sugars to hydrocarbons

ECAC European Civil Aviation Conference (Euroopan siviili-ilmailukonferenssi)

EEA European Environment Agency (Euroopan ympäristökeskus)

FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Saksan uusiutuvien resurssien virasto)

FRIPP Fushun Research Institute of Petroleum and Processing

FDHC FRIPP diesel hydrocracking technology

FD2J FRIPP diesel to jet fuel

FT Fischer-Tropsch –menetelmä

GA genetic algorithm (geneettinen algoritmi)

HEFA hydroprocessed esters and fatty acids

HHV higher heating value (korkeampi lämpöarvo)

HVGO heavy vacuum gas oil (raskas vakuumikaasuöljy)

IATA The International Air Transport Association (Kansainvälinen ilmakuljetusliitto)

ICAO International Civil Aviation Organization (Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö)

IEA International Energy Agency (Kansainvälinen energiajärjestö)

IEEP Institute for European Environmental Policy (Euroopan ympäristöpoliittinen instituutti)

Luke Luonnonvarakeskus

MHUG medium-pressure hydro-upgrading technology (keskisuuren paineen vetyjalostus)

OECD Organisation for Economic Cooperation and Development (Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö)

OPEC Organization of the Petroleum Exporting Countries

RIPP Sinopec Research Institute of Petroleum and Processing

SEC United States Securities and Exchange Commission (Yhdysvaltain arvopaperimarkkinoita valvova elin)

SQP sequential quadratic programming (sekvenssinen neliöohjelmointi)

SRGO straight-run gas oil (kaasuöljyn suoratisle)

toe tonne of equivalent oil (öljykvivalenttitonni)

1. Johdanto

1.1. Tutkimuksen tausta

Suomalaisessa kaupallisessa lentoliikenteessä käytettiin ensimmäistä kertaa biopohjaista polttoainetta 2011 Finnairin lennolla Helsingin ja Amsterdamin välillä (Trafi 2016a). Vuoden 2018 alkuun mennessä biopolttoaineiden käyttöä ei ole vielä saatu taloudellisesti kannattavaksi (ICAO 2017b), mutta poliittista tahtoa on silti saada ala kovaan kasvuun. Liikenne- ja viestintäministeriön vetämän työryhmän vuonna 2013 asettama tavoite on nostaa biokerosiinin osuus Suomen lentoliikenteessä EU:n tavoitetasolle, ja vähintään 40 prosenttiin vuonna 2050 (Liikenne- ja viestintäministeriö 2013). Vuonna 2011 EU:n komission yhteistyössä lentokonevalmistajien, lentoyhtiöiden ja biopolttoaineiden tuottajien kanssa julkaiseman tiekartan (*European Advanced Biofuels Flightpath*) tavoitteisiin kuuluu vuonna 2020 käyttää 2 miljoonaa tonnia biopolttoaineita lentoliikenteessä (European Commission). Lentoliikenteen polttoaineen kysyntä on ollut EU:ssa vuosina 2006 – 2016 suuruusluokaltaan 40 miljoonaa tonnia vuodessa (FuelsEurope 2017). Näin ollen vuoden 2020 tavoite olisi noin viisi prosenttia koko kysynnästä, mikäli kysyntä ei kasva merkittävästi seuraavina vuosina.

Lentoliikenne on luonteeltaan hyvin valtioiden rajoihin katsomatonta: koko maailman lentoliikenteestä vain 36 prosenttia matkustajakilometreinä mitattuna on valtioiden sisäistä liikennettä (IATA 2018a). Tämän lisäksi Suomen osuus EU:n lentomatkustajista vuonna 2016 oli 1,94 %, ja koko maailman lentomatkustajista vain 0,37 % (World Bank a). Koska valtaosa lennoista tehdään valtiosta toiseen ja Suomen osuus kaikesta lentoliikenteestä on muutaman tuhannesosan luokkaa, ei ole kovin merkittävää

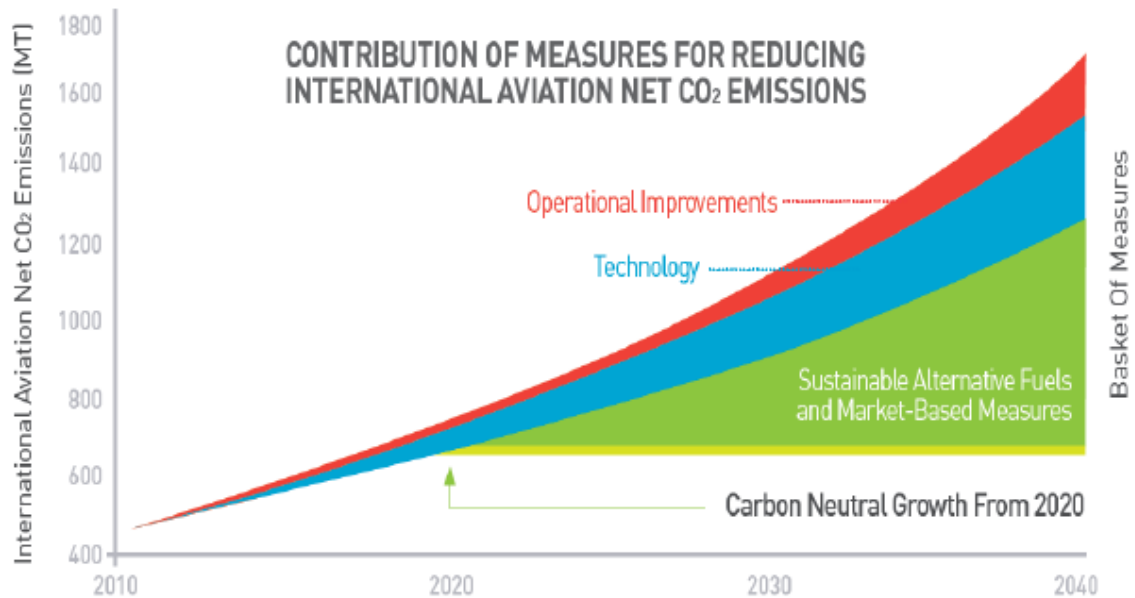
maailman lentopolttoaineiden tuotannon ja niiden aiheuttamien päästöjen kannalta mitä Suomen rajojen sisällä tehdään polttoaineen tuotannon suhteen.

Tilannetta tulee siis tarkastella vähintäänkin EU:n, mieluiten koko maailman tasolla. Vain näin pystytään arvioimaan, onko suunnitelluilla toimenpiteillä vaikutusta jalostettavaan öljyn määrään ja lentoliikenteen CO₂ –päästöihin. Ilmaston lämpeneminen, kuten englanninkielinen termi *global warming* kertoo, on lentoliikenteen tavoin valtioiden rajoista riippumaton globaali ilmiö. Lämpenemisellä on erisuuruisia ja erilaisia vaikutuksia eri puolilla maailmaa, mutta sillä ei ole suurta merkitystä, missä päin planeettaa päästöt tuotetaan.

Kansainvälisen siviili-ilmailujärjestö ICAO:n (*International Civil Aviation Organization*) ennusteen mukaan vuoteen 2050 mennessä perinteisten polttoaineiden kysyntä kansainvälisessä lentoliikenteessä saattaa kasvaa vuoden 2010 tasoon verrattuna jopa kuusinkertaiseksi (142 → 860 Mton/a), jos huomioon otetaan vain kysynnän voimakas kasvu ja kaluston uusimisen aiheuttama polttoaineen kulutuksen pieneneminen. Kun mukaan lasketaan myös arviot teknologian kehityksestä ja tehostamistoimenpiteistä lennonjohdossa ja infrastruktuurin käytössä, ICAO:n arvio globaalin lentoliikenteen polttoaineen kulutuksesta on 570 miljoonaa tonnia vuonna 2050, joka olisi neljä kertaa suurempi kuin vuoden 2010 kulutus. (ICAO 2017a)

Vuonna 2016 ICAO:n 39. yleiskokouksessa päätettiin ottaa käyttöön kansainväliselle lentoliikenteelle päästöhyvitysjärjestelmä CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*). Päästöhyvitysjärjestelmän tavoitteena on kansainvälisen lentoliikenteen hiilineutraali kasvu vuodesta 2020 eteenpäin. Tavoite ei ole realistinen pelkästään lentokoneiden teknisen kehityksen ja lennonjohdon tehostamisen avulla. Tavoitteeseen pääsemiseksi tarvitaan biopohjaisia polttoaineita

sekä päästöhyvitysjärjestelmä. Kuva 1 havainnollistaa eri keinojen osuutta hiilineutraalista kasvusta vuoteen 2040 asti. (Trafi 2016b)



Kuva 1. Lentoliikenteen hiilineutraali kasvu 2020 alkaen (Trafi 2016b).

Alun perin mukana oli 66 maata, joiden osuus kansainvälisestä lentoliikenteestä oli 86,5 %. Sen jälkeen useita muita maita on ilmoittautunut vapaaehtoisesti mukaan, mm. Venäjä, Intia ja Brasilia. Järjestelmän piirissä on siis lähes koko maailman lentoliikenne, tosin osa kehittyvistä maista on saanut vapautuksen järjestelmästä. Kuva 2 näyttää alun perin mukana olleet maat. (Trafi 2016b)

Taulukko 1. Autoliikenteen polttoainekomponenttien kulutus Suomessa vuosina 2015 – 2050 (Ympäristöministeriö 2017, Wikipedia).

Autoliikenteen polttoainekomponenttien kulutus (GWh/a)					
Polttoainekomponentti	2015	2030	2050	osuus 2015, %	osuus 2050, %
Fossiilinen bensiini	15910	11471	12198	34	29
Fossiilinen diesel	25497	24828	22753	54	54
Uusiutuva diesel	5032	4934	4621	11	11
Etanoli	810	721	764	1,7	1,8
Fossiilinen kaasu	30,3	103	216	0,064	0,51
Biokaasu	17,7	103	216	0,037	0,51
Vety	0	3,15	70,9	0	0,17
Sähkö	2,8	80	1330	0,0059	3,2
Yhteensä	47297	42163	40839		

Kun verrataan yhtäältä ennustetta lentokerosiinin kysynnän kovasta kasvusta ja toisaalta tavoitteita autoliikenteen käyttövoiman siirtymisestä pois fossiilisista polttoaineista, huomaa että tästä aiheutuu vahvaa ristivetoa raakaöljyn jalostustarpeelle. Taulukosta Taulukko 2 nähdään, että kerosiinin (lentokerosiinin lisäksi myös mm. valopetroli laskettu määrään mukaan) osuus OECD-maiden jalostustuotteista oli vuosina 2015 – 16 hieman alle 10 prosenttia (IEA 2018), kun taas bensiinin ja dieselin yhteenlaskettu osuus oli hieman yli 60 prosenttia.

Taulukko 2. Jalostamoiden tuotanto OECD-maissa vuosina 2015 – 16 Määrät tuhansia tonneja (IEA 2018).

Tuote	2015	2016
Nestekaasu	46 473	36 243
Teollisuusbenssiini	101 355	104 491
Bensiini yhteensä	603 094	604 929
Kerosiini yhteensä	184 437	187 442
Kaasuöljy/diesel	666 792	649 578
Raskas polttoöljy	143 065	148 897
Muut tuotteet	252 937	260 090
Yhteensä	1 998 153	1 991 670

Mikäli vuonna 2050 päästään lentoliikenteessä 40 prosentin tavoitteeseen biopolttoaineiden osalta, jäljelle jäävä osuus kerosiinista joka tehtäisiin fossiilisesta öljystä olisi silti yli kaksinkertainen tämänhetkiseen tasoon nähden. Uhkakuvana siis on, että vaikka bensiinin ja dieselin kulutus vähenee, lentokerosiinin kysyntä pitää öljynjalostuksen kysyntää korkealla, ja raakaöljyn kulutusta ei saada vähennettyä. Bensiinin ja dieselin kysynnän vähennyttyä ylijääneet jakeet käytettäisiin energiantuotantoon tavalla tai toisella, sillä öljynjalostaja haluaa tietenkin saada tuotteensa myytyä, ja tällä hetkellä tuotteille on varsin vähän muuta käyttöä kuin polttaa ne energiaksi.

Ottaen huomioon öljytuotteiden polttamisesta vapautuvan hiilidioksidin (CO₂) merkittävän aseman ilmastonmuutoksen aiheuttajana, maailman lämpenemisen hidastaminen on hyvin vaikeaa, mikäli öljyn kulutus ei vähene (IPCC 2013). Tässä diplomityössä tutkitaan tätä ongelmaa kolmesta näkökulmasta, näitä näkökulmia avataan tarkemmin tutkimusongelmia kuvaavassa kappaleessa 1.2.

Lentoliikenteen vaatimaan fossiilisen kerosiinin määrään vaikuttaa ratkaisevasti se, kuinka paljon uusiutuvista lähteistä pystytään valmistamaan biokerosiinia. Jalostamokapasiteetin ei luultavasti pitäisi muodostua pullonkaulaksi: ICAO:n laskelmien (ICAO 2017a) mukaan fossiilisen kerosiinin jopa sataprosenttinen korvaus uusiutuvilla polttoaineilla olisi mahdollista. Tämä skenaario tosin vaatisi suurta tuottavuuden kasvua maataloustuotannolta, viljelymaata tulisi olla erittäin runsaasti saatavilla raaka-ainekasvien viljelyyn, tuotantoprosessien tehokkuuden tulee parantua ja politiikan tulee ohjata tuotantoa uusiutuvien lentopolttoaineiden suuntaan.

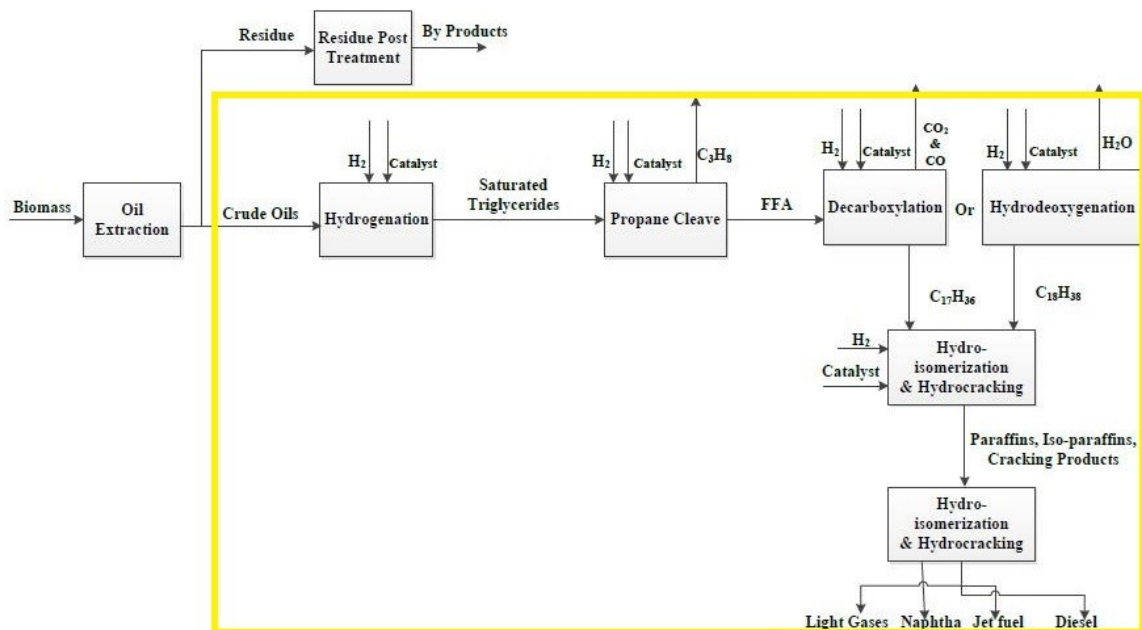
Fossiilisen kerosiinin sataprosenttinen korvaus uusiutuvilla polttoaineilla vaatisi noin 170 uuden biojalostamon rakentamisen maailmassa vuosittain vuosina 2020 – 2050. Viime vuosina jalostamoita on rakennettu noin 70 vuosittain, eli hieman yli kaksinkertainen määrä laitoksia pitäisi pystyä rakentamaan. Tälle tulisi hintaa arviolta 15 – 60 miljardia USD/a, olettaen että kasvuvauhti on kohtalaisen tasaista. Vuonna 2016 downstream-liiketoiminnan (öljy- ja kaasuteollisuus raakaöljyn jalostamisesta eteenpäin) investoinnit olivat koko maailmassa 215 miljardia USD (IEA 2017), joten muutama kymmenen miljardia vuodessa biojalostamoiden rakentamiseen on suuruusluokaltaan toteutettavissa, mikäli poliittista tahtoa löytyy ajaa asiaa ja yrityksillä on taloudellisia insentiivejä tehdä kyseisiä investointeja.

Yksi merkittävä haaste biokerosiinin valmistukselle on se, missä määrin raaka-aineita on saatavilla. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan biopohjaisten lentopolttoaineiden valmistusta sekä sitä, kuinka paljon raaka-ainetta ennustetaan olevan käytettävissä tulevaisuudessa niiden tuotantoon Suomessa ja muualla maailmassa.

1.1.1. Biopohjaisten lentopolttoaineiden valmistus

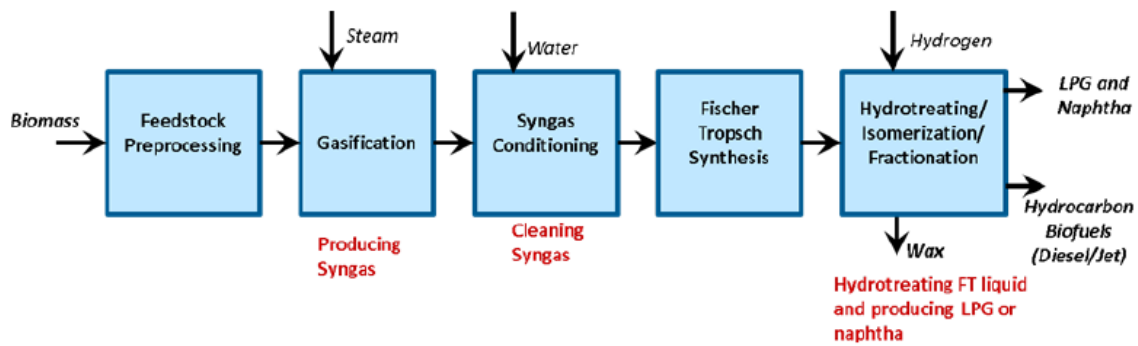
Vuoteen 2017 mennessä neljä tapaa valmistaa uusiutuvaa lentopolttoainetta kaupalliseen käyttöön on saanut ASTM Internationalin (ent. *American Society for Testing and Materials*) hyväksynnän (de Jong, Antonissen et al. 2017). Nämä menetelmät ovat:

1. Esterien ja rasvahappojen vetykäsittely, HEFA (*hydroprocessed esters and fatty acids*). HEFA-menetelmässä käytetään uusiutuvan kerosiinin valmistukseen paljolti samoja raaka-aineita kuin biodieselin valmistukseen. Soijaöljyn ja palmuöljyn käyttö polttoaineiden valmistukseen aiheuttaa kilpailua myös ruoantuotannon kanssa, joten näiden käytön lisääminen ei ole ongelmaton. Muita kasviöljyä, käytettyä paistorasvaa ja levistä saatua öljyä käytettäessä ei vastaavaa ongelmaa ole. HEFA-menetelmässä käytetään vetyä rasvahappojen saturaatioon sekä hapen poistamiseen. Hiiliketjuista saadaan sopivan pituisia ja muotoisia vetykrakkauksella ja isomerisaatiolla. Kuvassa Kuva 3 on hydroprosessoinnalla valmistetun kerosiinin prosessikaavio biomassasta alkaen, HEFA-menetelmän osuus on merkitty kuvaan keltaisella laatikolla. (de Jong, Antonissen et al. 2017, Wang, Tao et al. 2016)



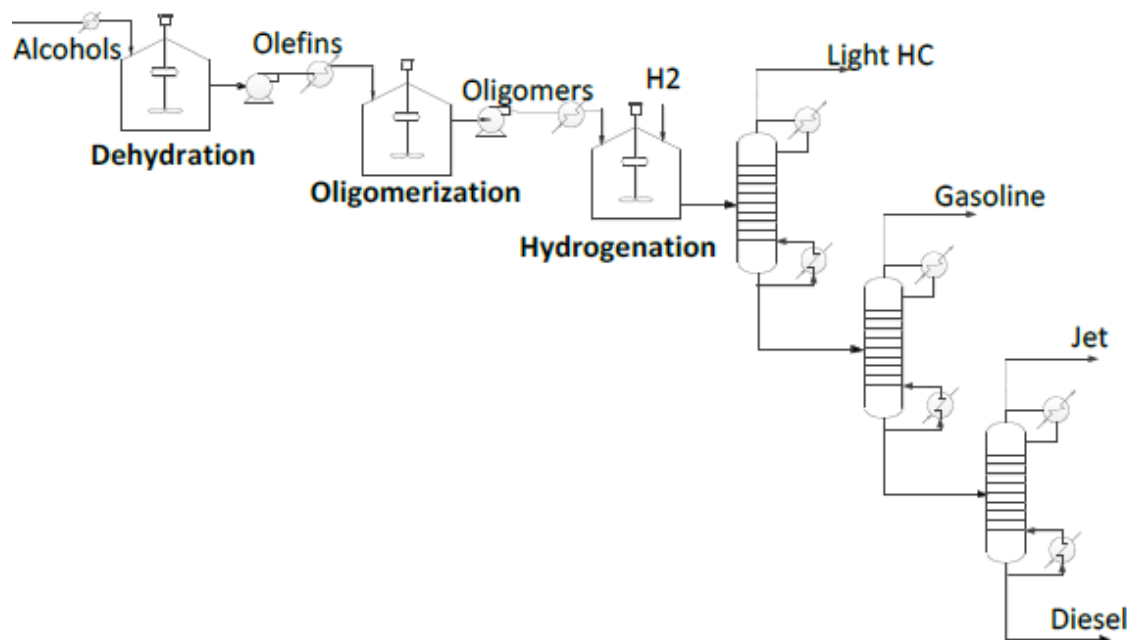
Kuva 3. HEFA-prosessin prosessikaavio. (Wang, Tao et al. 2016)

2. Fischer-Tropsch-menetelmä, FT. FT-menetelmässä, kuten muissakin kaasutukseen pohjautuvissa polttoaineiden valmistusmenetelmissä, raaka-aineen hiilipitoisuus on tärkeää, sillä se vaikuttaa merkittävästi lopputuotteiden saantoon. Myös vetypitoisuudella on merkitystä, sillä raaka-aineen sisältämä hyödyntämiskelpoinen vety vähentää prosessiin syötetyn vedyn tarvetta ja sitä kautta tuotannon kustannuksia. Hiilipitoisuus vaihtelee esimerkiksi puupohjaisilla raaka-aineilla tyypillisesti välillä 46 – 53 % ja maatalousjätteillä välillä 38 – 58 %. Menetelmässä biomassa ensin kuivataan ja pilkotaan pieniksi palasiksi, sen jälkeen siitä saadaan kuumentamalla se korkeassa lämpötilassa hiilimonoksidia ja vetyä sisältävää synteetikaasua. Kuva 4 esittää FT-prosessin prosessikaaviota. FT-synteesillä saadaan synteetikaasusta nestemäisiä hiilivetyjä, joita voidaan jatkojalostaa halutunlaisiksi polttoaineiksi. (Wang, Tao et al. 2016)



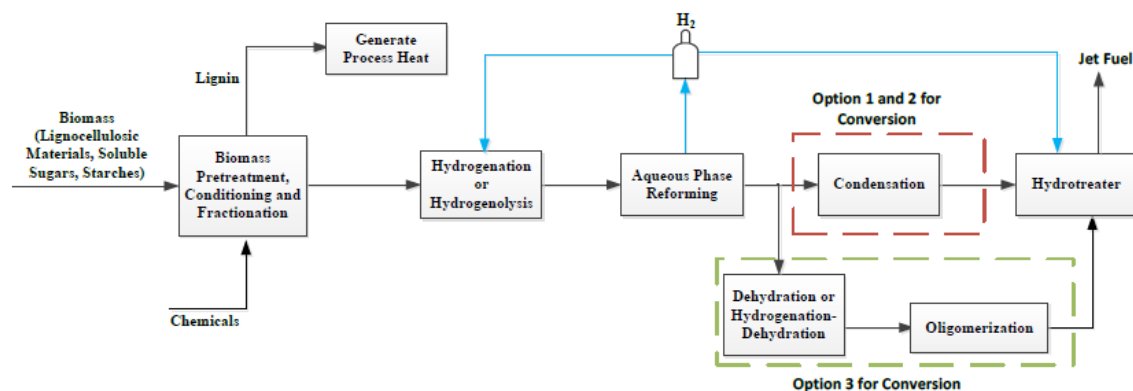
Kuva 4. FT-prosessin prosessikaavio. (Wang, Tao et al. 2016)

3. **Kerosiinin valmistus alkoholista, ATJ (alcohol to jet).** Alkoholeja voidaan valmistaa polttoaineeksi monenlaisesta biomassasta. Yhdysvalloissa etanolia valmistetaan eniten maissista (Wang, Tao et al. 2016), kun taas Brasiliassa raaka-aineena käytetään lähes yksinomaan sokeriruokoa (USDA 2017). Etanolia voidaan käyttää valtaosassa autoja bensiinin lisänä maksimissaan 10 – 15 %, sekä etanolia käyttämään valmistetuissa autoissa maksimissaan 85 % (jolloin bensiiniä on loput 15 %). Etanolia voidaan valmistaa biokemiallisesti ja fermentoimalla, tai termokemiallisella konversiolla. Ensimmäisessä menetelmässä selluloosa ja hemiselluloosa hydrolysoidaan entsyymaattisesti liukoiksi sokereiksi, jonka jälkeen ne fermentoidaan hiivojen tai bakteerien avulla etanoliksi. Jälkimmäisessä menetelmässä biomassasta saadaan etanolia sekä hiilivetyperäisiä polttoaineita kaasutuksella ja alkoholisynteetillä. Alkoholeista saadaan lentopolttoainetta dehydraamalla, oligomerisoimalla sekä vedyttämällä alkoholimolekyylit. Kuva 5 esittää tätä prosessia. (Wang, Tao et al. 2016)



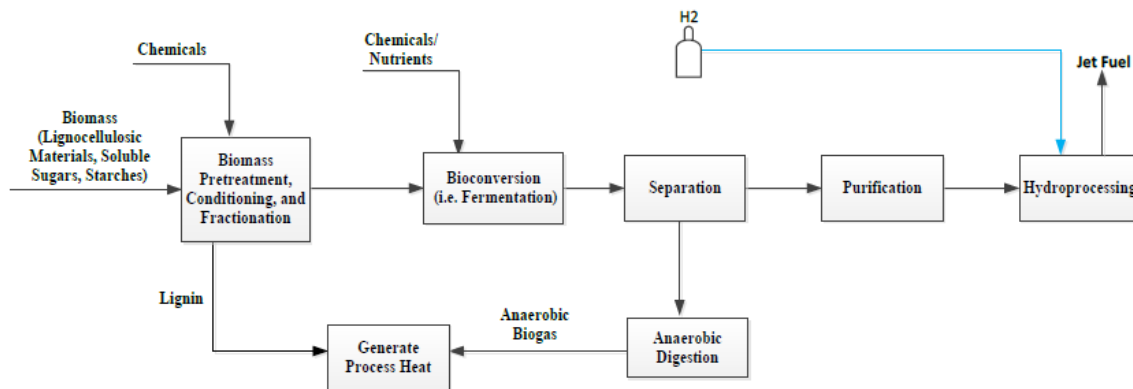
Kuva 5. Kerosiinin ja muiden polttoaineiden valmistus alkoholeista. (Wang, Tao et al. 2016)

4. **Hiilivetyjen valmistus sokereista, DSHC (direct sugars to hydrocarbons).** Sokeripohjaisista raaka-aineista voidaan valmistaa kahdella tavalla kerosiinia. Sokeria ja sokeripohjaisia puolivalmisteita voidaan jalostaa katalyyttisesti hiilivedyiksi. Kuva 6 esittää tätä prosessia.



Kuva 6. Sokerien katalyyttinen jalostus kerosiiniksi. (Wang, Tao et al. 2016)

Toinen tapa on näiden lähtöaineiden biologinen konversio hiilivedyiksi. Ensimmäiseen menetelmään voidaan käyttää monenlaisia raaka-aineita, esimerkiksi sakkaroosia sokeriruo'osta tai sokerijuurikkaista, maissisokeria maissitärkkelyksestä tai lignoselluloosan sokeria jota saadaan hemiselluloosan ja selluloosan hydrolyysillä. Kuva 7 esittää tätä prosessia.



Kuva 7. Sokerien biologinen konversio kerosiiniksi. (Wang, Tao et al. 2016)

Jälkimmäiseen menetelmään tyypillisiä raaka-aineita ovat sokeriruo'ko, maissinjyvät ja lännenhirssi (Staples, Malina et al. 2014). Esimerkkiprosessi ensin mainitusta menetelmästä käyttää raaka-aineenaan pääosin maissin lehtiä ja rankoja sekä muita kasvin osia (*corn stover*), joita jää yli, kun sato on korjattu. Prosessissa lignoselluloosaa sisältävä biomassa esikäsitellään deasetyloimalla ja laimealla hapolla, jäljellä oleva selluloosa hydrolysoidaan entsyymaattisesti, ja lopuksi saatu hydrolysaatti konvertoidaan katalyyttisesti teollisuusbensiini (*naphtha*)- ja dieseljakeiksi jatkojalostusta varten (Davis, Tao et al. 2015). (Wang, Tao et al. 2016)

Näillä menetelmillä valmistettua biokerosiinia saa toistaiseksi lisätä fossiilisen kerosiinin sekaan maksimissaan 50 %, jotta se voi täyttää standardin ASTM D1665 (IATA 2015). Myös fossiilista polttoainetta tarvitaan siis toistaiseksi lentoliikenteessä. Näiden lisäksi useampi menetelmä on arvioitavana (tilanne vuonna 2018), joten todennäköisesti

tulevina vuosikymmeninä uusiutuvia lentopolttoaineita voidaan valmistaa kaupalliseen lentoliikenteeseen useilla eri menetelmillä.

1.1.2. Biopolttoaineiden raaka-aineiden saatavuus muualla maailmassa

Kahden suunnitteluyrityksen muodostaman konsortion Iso-Britannian liikennevirastolle (*Department for Transport*) tekemässä selvityksessä (Arup URS consortium 2014) on arvioitu kattavasti muutaman kymmenen raaka-aineen sopivuutta biopolttoaineiden valmistukseen. Näistä raaka-aineista 28 on valittu mukaan Euroopan parlamentin ja neuvoston uusiutuvan energian direktiiviin. Näiden raaka-aineiden vaikutus lasketaan kaksinkertaisena niiden energiasisältöön verrattuna tavoiteltaessa vähintään 20 prosentin osuutta uusituvalle energialle EU:n energian loppukulutuksesta ja 10 prosentin osuutta EU:n liikenteessä, joten näihin raaka-aineisiin kohdistuu suurin mielenkiinto. Tämän diplomityön kannalta raportin kiinnostavin osuus on sen analyysissä raaka-aineiden tarjontapotentiaalista (tilanne raportin tekohetkellä ja vuonna 2020 EU:n alueella sekä koko maailmassa), kasvupotentiaalista vuosina 2020 – 2030 sekä hinta-arvioista kustakin raaka-aineesta tehdyille biopolttoaineelle.

Liitteessä 1 on kaavio raaka-aineista ja niistä saatavista erilaisista biopolttoaineista. Raaka-aineista yksitoista on sellaisia, joista on mahdollista valmistaa lentokerosiinia. Tämä ei vielä tarkoita, että lentokerosiini olisi välttämättä paras polttoainevaihtoehto näille raaka-aineille, vain että se on teknisesti mahdollista. Paperiteollisuuden sivutuotteena syntyvästä mäntypiestä voidaan valmistaa kerosiinia yksinkertaistettuna vetykäsittelyllä (*hydro-treatment*). Musta- ja sulfiittilipeästä, puunkuorista, oksista ja lehdistä, sahanpurusta ja kutterilastuista, tyhjistä palmuhedelmätertuista, pähkinäkuorista, lyhytkiertoisesta energiapuusta (*short rotation coppice*), raa'asta glyserolista, norsunheinistä ja muiden kuin ruokakasvien selluloosasta, lyhytkiertoisen

metsäalan puista (*short rotation forestry*), ja pienestä puutavarasta (*small round-wood*) saadaan kerosiinia Fischer-Tropsch –menetelmällä.

Nämä raaka-aineet on koottu taulukkoon

Taulukko 3. Taulukossa on arvio siitä, kuinka paljon kustakin raaka-aineesta on mahdollista valmistaa biopolttoaineita koko maailmassa 2013 ja 2020. Taulukossa on myös arvio kasvupotentiaalista vuodesta 2020 vuoteen 2030 asteikolla - - - (suurin vähentyminen) – + + + (suurin kasvaminen). On tärkeää huomata, että raportin arviot polttoainemääristä ovat teoreettisia maksimimääriä, joissa ei ole lainkaan huomioitu kilpailevia käyttökohteita. Neljästä tuotantopotentiaaliltaan suurimmasta raaka-aineesta musta- ja sulfiittilipeä sekä puunkuori, oksat ja lehdet käytetään jo hyvin suurelta osin hyödyksi tällä hetkellä energiantuotannossa. Näiden käyttö biokerosiinien valmistukseen johtaisi siis tarpeeseen löytää korvaava energian lähde, ja mikäli tämä korvaava energia tulisi fossiilisista polttoaineista ei kokonaishiilidioksidipäästöjä todennäköisesti saataisi vähennettyä.

Vaikka näiden raaka-aineiden kilpaileville käytöillä keksittäisiin kestävä korvaaja, näistä saataisiin silti vuonna 2020 vain noin 2000 TWh edestä biopolttoaineita. ICAO:n ennusteen (ICAO 2017a) mukaan vuonna 2020 maailmanlaajuisen lentoliikenteen polttoaineenkulutus on noin 3000 TWh, eli puolet enemmän kuin näistä yhdestätoista raaka-aineesta olisi teoriassa mahdollista valmistaa. Ainakin vuoden 2020 osalta näyttää siis siltä, että uusiutuvaa raaka-ainetta ei olisi saatavilla tarpeeksi lentoliikenteen vaatimaa polttoainemäärää varten.

Taulukko 3. Mahdolliset raaka-aineet biokerosiinille ja niiden tuotantopotentiaalit (Arup URS consortium 2014).

Raaka-aine	2013 (TWh)	2020 (TWh)	Kasvupotentiaali 2020 → 2030
Pieni puutavara	979	912	+
Musta- ja sulfiittilipeä	387	476	+
Puunkuori, oksat, lehdet	383	382	+
Sahanpuru ja kutterilastut	153	171	++
Tyhjät palmuhedelmättertut	23	48	+++
Pähkinäkuoret	15	17	++
Lyhytkiertoinen energiapuu	11	13	+++
Raaka glyseroli	7	12	++
Norsunheinät, muiden kuin ruokakasvien selluloosa	2	7	+++
Mäntypiki	4	5	++
Lyhytkiertoinen metsäala	0	0	+++

Verrattaessa raportin arvioita biopolttoaineiden potentiaalisesta valmistuskapasiteetista EU:n alueella vuonna 2020 Euroopan ympäristökeskuksen (EEA, *European environment agency*) vuonna 2006 tekemään arvioon (European Environment Agency 2006), brittiselvitys päättyy hieman pienempään arvioon. Taulukkoon Taulukko 4 on koottu molempien selvitysten arviot. Raporttien luvut eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä EEA:n tekemässä selvityksessä on arvioitu vain kiinteiden ja kaasumaisten biopolttoaineiden tuotantomääriä. Nestemäisiä polttoaineita valmistettaessa aiheutuu konversiohäviöitä, joita ei ole laskettu selvityksessä mukaan.

Taulukko 4. Vertailu kahden selvityksen välillä biopolttoaineiden tuotantopotentiaalista EU:ssa vuonna 2020. (Arup URS consortium 2014, European Environment Agency 2006)

Polttoaine	Arup URS consortium	EEA
Lentokerosiini	728 TWh	
Etanoli	260 TWh	
Kaasumaiset polttoaineet	511 TWh	
Biodiesel	39 TWh	
Yhteensä	1538 TWh	2500 – 2800 TWh

Euroopan ympäristöpoliittinen instituutti on arvioinut kuinka paljon EU:ssa olisi käyttökelpoista uutta viljelyalaa energiakasveja varten. Energiakasvit ovat kasveja, joilla ei ole käyttöä ihmisten tai eläinten ravintona, vaan niitä kasvatetaan lähes yksinomaan energian tuotantoon. Niitä kasvatetaan maataloudessa, ei niinkään metsissä. Tässä tapauksessa on tutkittu pääosin kahdenlaisia energiakasveja: monivuotisia ruohovartisia kasveja kuten norsunheiniä ja hirssejä sekä lyhytkiertoisia energiapuita, kuten pajua ja haapaa. Monivuotisista ruohovartisista kasveista saadaan satoa vuosittain, kun taas lyhytkiertoisia energiapuita kaadetaan yleensä kahden – viiden vuoden välein. Maa ei saa olla kyseisellä hetkellä viljelykäytössä, jotta energiakasvien kasvatusta ei kilpailisi ruoantuotannon kanssa. (Allen, Kretschmer et al. 2014)

Raportin mukaan EU:n alueella on noin 1,35 miljoonaa hehtaaria maata, jolle kannattaa tehdä lisäselvityksiä sen soveltuvuudesta energiakasvien viljelyyn. Ala vastaa kooltaan suunnilleen Etelä-Pohjanmaan maakuntaa (1,4 Mha), Kuva 8. Ala vastaa myös hieman alle yhtä prosenttia EU-28:n alueella käytössä olevasta maatalousmaasta (*utilised agricultural area*, UAA) (yht. 182 Mha). Käyttökelpoista maatalousmaata ei siis ole kovin paljoa vapaana energiakasvien laajamittaiseen viljelyyn ainakaan EU:n alueella. (Allen, Kretschmer et al. 2014)



Kuva 8. Etelä-Pohjanmaan maakunta. (Google maps)

Mikäli koko edellä mainittu pinta-ala saataisiin viljelykäyttöön, raportin mukaan sen voitaisiin arvioida tuottavan satoa 4,7 – 11,5 t/ha alueilla, jotka ovat olleet hylättyinä tai saastuneina, ja 11,5 – 17,5 t/ha alueilta jotka ovat olleet kesannolla. Maan ollessa kesannolla, sillä ei viljellä mitään vuoden tai useamman aikana, jotta maaperä uusiutuisi. Yhteensä koko alalta saataisiin noin 7,7 – 16,7 Mt kuivaa biomassaa vuosittain. Raportissa on käytetty etanolin, dieselin ja bensiinin saantoa kerosiinin sijasta arvioitaessa biopolttoaineiden kokonaistuotantoa, joten tilanteessa jossa tätä alaa haluttaisiin käyttää valtaosin biokerosiinin tuotantoon, saanto olisi pienempi. Raportissa on käytetty muuntokerrointa 0,23 t biopolttoaineita per 1 t kuivaa biomassaa kuvaamaan eri valmistusmenetelmien ja polttoaineiden keskiarvoa. Näin 7,7 – 16,7 Mt biomassaa saataisiin noin 16 – 34 TWh edestä biopolttoaineita.

Kun huomioidaan arvio koko maailman lentopolttoaineiden kulutuksesta vuonna 2020 (3000 TWh) (ICAO 2017a) ja Euroopan osuus koko maailman lentoliikenteen matkustajakilometreistä vuonna 2017 (26,5 %) (IATA 2018a), voidaan arvioida, että käyttämättä olevalla viljelymaalla voitaisiin kasvattaa energiakasveja raaka-aineeksi kattamaan korkeintaan 2 – 4 % Euroopan lentoliikenteen tarvitsemasta polttoaineesta.

1.1.3. Biopolttoaineiden tuotantokapasiteetti Suomessa

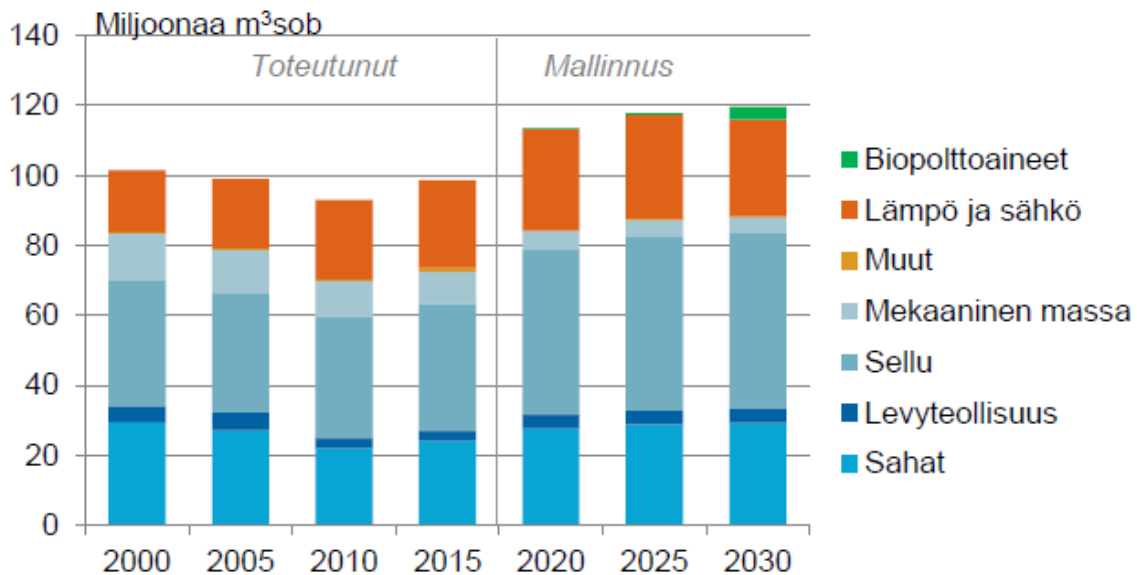
Konsultointi- ja suunnitteluyritys Pöyry teki 2017 selvityksen (Pöyry 2017) Valtioneuvostolle metsäbiomassan kustannustehokkaasta käytöstä. Selvityksessä arvioitiin kaksi erilaista skenaariota biopolttoaineiden tuotannolle, matala tuotantoskenaario ja korkea tuotantoskenaario. Raportin mukaan uusin VTT:n biopolttoaineiden kulutusarvio vuodelle 2030 on noin 1,1 Mtoe (12,8 TWh). Uutta tuotantokapasiteettia tarvittaisiin vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna noin 600 ktoe (7 TWh) täydentämään Nesteen ja UPM:n uusiutuvan dieselin tuotantokapasiteettia (noin 500 ktoe = 5,8 TWh vuonna 2017).

Matalan biopolttoaineiden tuotantoskenaarion mukaan Suomessa voitaisiin vuonna 2030 tuottaa biopolttoaineita metsäbiomassasta 300 ktoe, eli noin 3,5 TWh. Loput vaadittavasta 600 ktoen lisäkapasiteetista saataisiin olemassa olevien jalostamoiden kapasiteetin lisäyksellä, käyttäen raaka-aineina jäterasvoja ja -öljyjä sekä mäntyöljyä. Raportissa arvioidaan uutta tuotantoa varten rakennettavan kolme kapasiteetiltaan 100 ktoe/v tuotantolaitosta, jotka voisivat saada raaka-aineensa teollisuuden sivuvirroista ja metsähakkeesta.

Korkean tuotantoskenaarion lähtökohtana on tilanne, jossa vuonna 2030 tuotettaisiin 700 ktoe (8,1 TWh) uusiutuvaa bensiiniä ja dieseliä vuodessa. Tästä uudesta

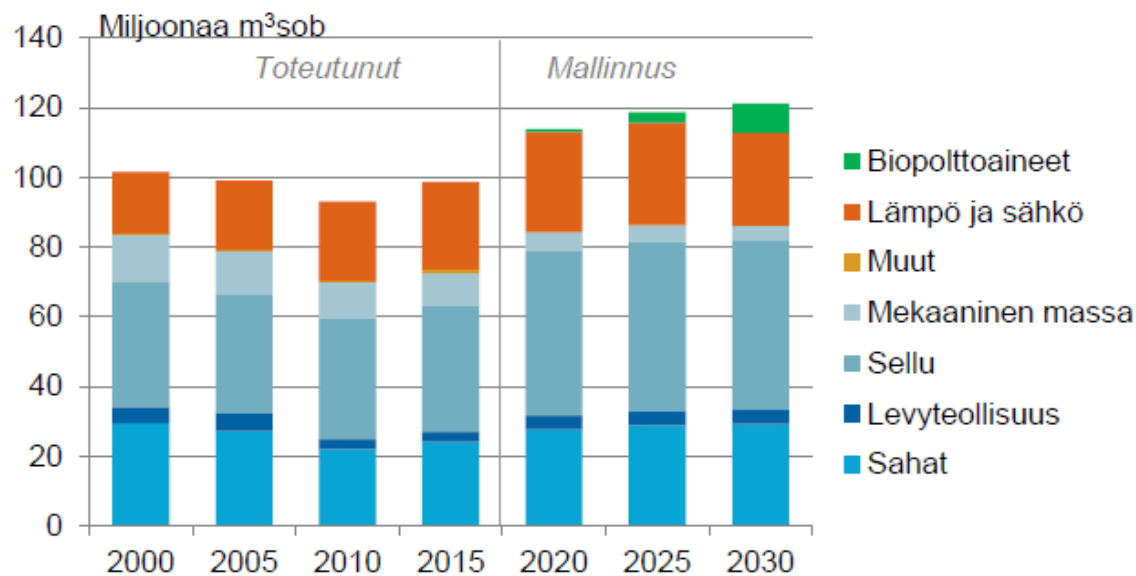
kapasiteetista riittäisi mahdollisesti myös vientiin uusiutuvia polttoaineita. Tässä skenaariossa rakennettaisiin matalassa skenaariossa mainittujen tuotantolaitosten lisäksi kaksi 100 ktoe/v tuotantolaitosta sekä yksi suurempi, 200 ktoe/v laitos.

Raportin arvion mukaan matalassa tuotantoskenaariossa Suomen puunkäyttö kasvaa vuoden 2015 tasosta (99 miljoonaa m³) 120 miljoonaan m³:iin vuonna 2030. Tästä 3,7 miljoonaa m³ menisi biopolttoaineiden tuotantoon. Kuva 9 esittelee puunkäytön käyttökohteittain.



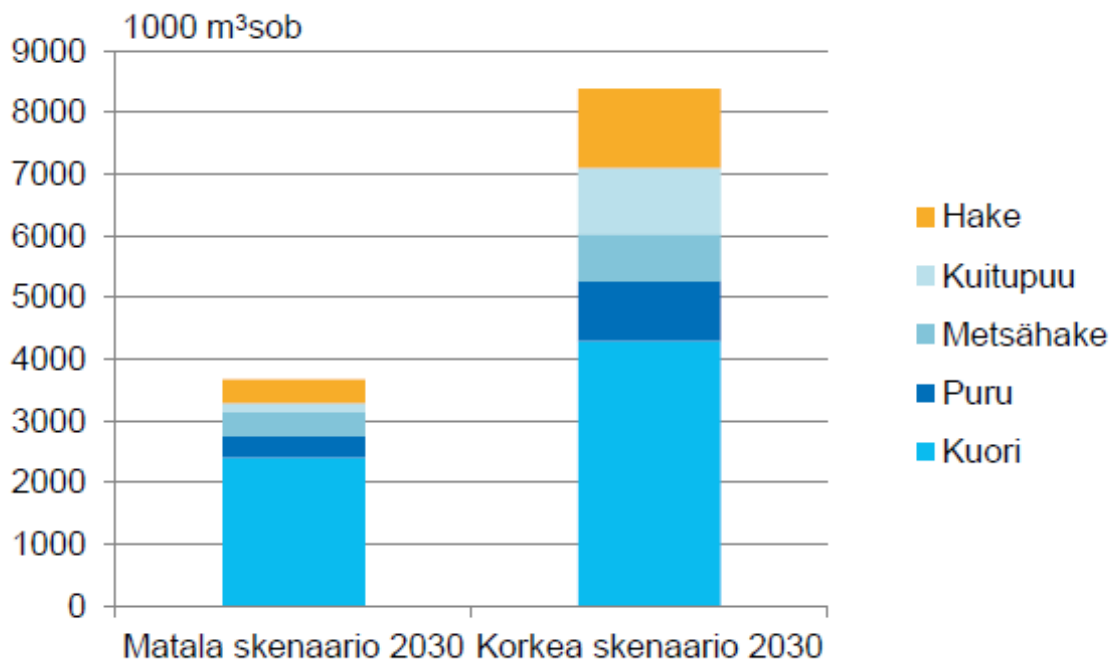
Kuva 9. Suomen puunkäyttö matalan tuotannon skenaariossa (Pöyry 2017).

Korkean tuotannon skenaariossa biopolttoaineiden tuotanto vaatisi 8,4 miljoonaa m³ puuta vuonna 2030. Puunkäytön kokonaismäärä ei kuitenkaan kasva vastaavassa suhteessa matalaan tuotantoskenaarioon verrattuna, määrä jäisi noin 121 miljoonaan m³:iin vuonna 2030. Suuri ero skenaarioiden välillä on arvioitu olevan lämmön- ja sähköntuotantoon käytetyn puun määrässä. Matalan tuotannon skenaariossa määrä kasvaa 2,6 miljoonaa m³ vuodessa, korkean tuotannon skenaariossa määrä vähenee 1,1 miljoonaa m³. Kuva 10 esittelee puunkäytön kohteittain tässä skenaariossa.



Kuva 10. Suomen puunkäyttö korkean tuotannon skenaariossa (Pöyry 2017).

Raportissa on myös vertailtu, mistä jakeista biopolttoaineisiin käytetty puu on peräisin. Kuva 11 näyttää käytetyn puun määrän jakeittain. Kuvasta huomaa, että korkeamman tuotannon skenaariossa kuitupuun ja hakkeen suhteellinen osuus nousee selkeästi suuremmaksi kuin matalan tuotannon skenaariossa.



Kuva 11. Biopolttoaineisiin käytetty puun määrä jakeittain (Pöyry 2017).

Suomen luonnossa metsää on paljon. Luonnonvarakeskuksen (Luke) uusimman arvion mukaan (Luonnonvarakeskus 2018) puuston määrä on 2500 miljoonaa m^3 , ja vuotuinen kasvu on 107 miljoonaa m^3 . 10-vuotiskaudelle 2015 – 2024 Luken arvio puuntuotannollisesti suurimmasta kestävästä hakkuumahdollisuudesta on 84,3 miljoonaa m^3 runkopuuta vuodessa. Seuraavalle 10-vuotiskaudelle arvio on 93 miljoonaa m^3 . Korkeamman tuotantoskenaarion vaatimat 8,4 miljoonaa m^3 puuta, joilla saataisiin tuotettua noin 8 TWh edestä biopolttoaineita ovat vain kymmenen prosenttia Suomen metsien kestävästä hakkuupotentiaalista. Raaka-aineen määrä itsessään ei siis aseta kovin suuria rajoitteita biopolttoaineiden tuotannolle Suomessa.

Puulle on kuitenkin muitakin käyttäjiä Suomen teollisuudessa. Pöyryn selvityksen mukaan (Pöyry 2017) puupohjaisten biopolttoaineiden 700 ktoe/v tuotantomäärä ohjaisi puutavaraa pois metsäteollisuudesta ja sivutuotteita pois energiasektorilta. Tällä arvioidaan olevan kuitenkin vielä positiivisia vaikutuksia kansantalouteen. Vaarana toisaalta on, että kohonnut puun hinta johtaa metsäteollisuudessa laitosten sulkemisiin

tai vähentää halukkuutta investointeihin. Tämä tosin johtuu selvityksen arvion mukaan enemmän metsäteollisuuden kasvavan tuotannon aiheuttamasta kysynnän kasvusta puumarkkinoilla, joskin biopolttoaineiden tuotannon lisääminen nostaa sekin puun kysyntää.

1.1.4. Öljynjalostuksen vähenemisen muut vaikutukset

Tässä kappaleessa on arvioitu, mitä muita, polttoaineiden korvaamiseen liittymättömiä, vaikutuksia öljynkäytön lopettamisella olisi maailmassa. Työssä ei ole tehty kattavaa selvitystä kaikesta mihin öljynkäytön lopettaminen tai vähentäminen vaikuttaa, tutkittu vain muutamaa aihepiiriä.

Koska öljy on kaikkialla maailmassa niin tärkeä energian lähde, etenkin liikenteessä, alan taloudellinen merkitys on valtava. Suomessa ”monesta muusta sektorista poiketen liikenne on edelleen lähes täysin riippuvainen fossiilisesta polttoaineesta energianlähteenä” (Liikenne- ja viestintäministeriö 2013). Raakaöljyn kysyntä maailmassa oli vuonna 2016 95,4 miljoonaa barreliä päivässä, ja OPEC:n ennusteen mukaan kysyntä ylittää sata miljoonaa barreliä päivässä jo vuonna 2020 (OPEC 2018). Sata miljoonaa barreliä päivässä viidenkymmenen dollarin barrelihintaan tarkoittaa kaupankäyntiä pelkällä raakaöljyllä viiden miljardin dollarin edestä joka päivä. Sadan dollarin barrelihinta tarkoittaisi kaupankäynnin arvon kaksinkertaistumista kymmeneen miljardiin päivässä.

Öllyteollisuus tukitoimintoineen työllistää yksistään Yhdysvalloissa puoli miljoonaa ihmistä (U.S. Department of Energy 2017). Yhdysvallat tuottaa noin kymmenen prosenttia maailman raakaöljystä, joten hyvin karkeasti arvioiden maailman mittakaavassa öljyteollisuus työllistää miljoonia ihmisiä (OPEC 2018). Osa esimerkiksi jalostukseen liittyvästä teollisuudesta on varmasti sellaista, joka tulee pysymään

hengissä, vaikka raakaöljyn käyttö loppuisi kokonaan. Biokerosiini ja muut uusiutuvista lähteistä valmistettavat polttoaineet valmistetaan kohtalaisen samankaltaisilla prosesseilla kuin fossiilisetkin polttoaineet. Suuri määrä etenkin öljynporaukseen liittyvistä työpaikoista tulee kuitenkin häviämään raakaöljyn kysynnän seurauksena. Toisaalta uusia työpaikkoja syntyy uusien raaka-aineiden kasvatuksen ja käsittelyn pariin, mutta nämä työpaikat saattavat olla hyvin kaukana öljyn tuotannon työpaikoista ja vaatia erilaista osaamista, joten samat ihmiset eivät välttämättä työllisty kovin hyvin näihin uusiin työpaikkoihin.

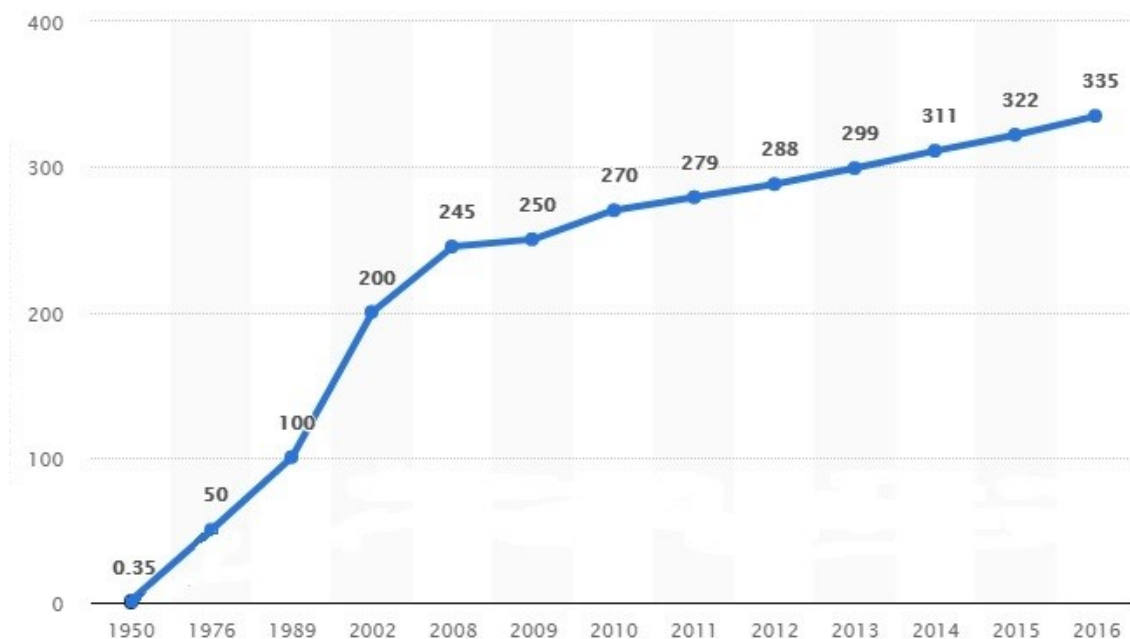
Tämä voidaan nähdä 1900-luvulla eläneen taloustieteilijä Joseph Schumpeterin sanoin luovana tuhona, vanhan toimialan häviämisenä uuden tieltä. Näin valtavan yhteiskunnallisen muutoksen voidaan kuitenkin olettaa aiheuttavan merkittävää vastustusta: työpaikkansa menettävien miljoonien työntekijöiden taholta sekä raakaöljyä tuottavien maiden suunnalta. Yksistään Venäjällä on arviolta 80 miljardin barrelin öljyvarannot (OPEC 2016), mikä tarkoittaa 60 dollarin barrelihinnalla hieman alle 500 miljardin dollarin arvosta raaka-ainetta. Tosin näistä öljyvarannoista saatavat tulot eivät riipu suoraan öljyn markkinahinnasta, vaan sen ja porauskustannusten välisestä erosta. Poraamattomien raakaöljyvarantojen suuruutta tarkastellessa on helppo nähdä, etteivät etenkin köyhemmät maat ole kovin helposti halukkaita jättämään mustaa kultaansa maaperään tai merenpohjaan.

Venäjän valtion vientituloista 12 – 17 % on vuosina 2011 – 2016 tullut kaasu- ja öljytuloista (Simola, Solanko 2017), joka olisi valtiolle erittäin suuri aukko paikattavaksi. On hyvin mahdollista, että öljyntuottajamaat vastustaisivat jyrkästi mahdollisia rajoituksia sekä verotuksellisia ja muunlaisia toimenpiteitä, jotka ohjaisivat kysyntää pois fossiilisista polttoaineista uusiutuvien suuntaan. Näin suuret muutokset valtioiden tuloissa aiheuttaisivat jo merkittäviä muutoksia valtioiden välisissä taloudellisissa voimasuhteissa: esimerkiksi Venäjä myy naapurimaihinsa energiaa markkinahintoja

alemmalla hinnalla saadakseen vaikutusvaltaa näihin. Ilman öljytuloja tämänkaltaisen vaikuttaminen ei onnistuisi enää samassa mittakaavassa.

Erilaisia muovilaatuja valmistetaan maailmassa yhteensä noin 320 Mton vuosittain. Tästä määrästä noin 2 Mton, eli vain 0,6 % oli vuonna 2017 biopohjaista muovia. Etujärjestö European Bioplastics uskoo biopohjaisen muovin tuotantokapasiteetin kasvavan vajaalla viidenneksellä vuoteen 2022 mennessä, mikä tarkoittaa keskimäärin 3,5 % vuosikasvua. Tällä kasvuvauhdilla kestäisi noin 150 vuotta ennen kuin biomuovin tuotantokapasiteetti saavuttaisi tämänhetkisen muovintuotannon määrän, mikäli ei oteta huomioon muovin kysynnän kasvua. Mikäli muovin kokonaistuotanto kasvaisi saman 3,5 % vuodessa, niin biomuovin tuotannon pitäisi kasvaa keskimäärin 21,3 % vuodessa, jotta se saavuttaisi muovin kokonaistuotannon määrän vuonna 2050. (European Bioplastics 2017)

Kuvasta Kuva 12 näkee, että muovintuotanto kasvoi vuosina 2008 – 2016 keskimäärin noin 4 % vuodessa. Vaikuttaako vuosina 2017 – 2018 paljon esillä ollut keskustelu (HS 2017, HS 2018a, IL 2018) erinäisten muoviesineiden kieltämisestä muovin kysyntään, jää nähtäväksi lähivuosina.



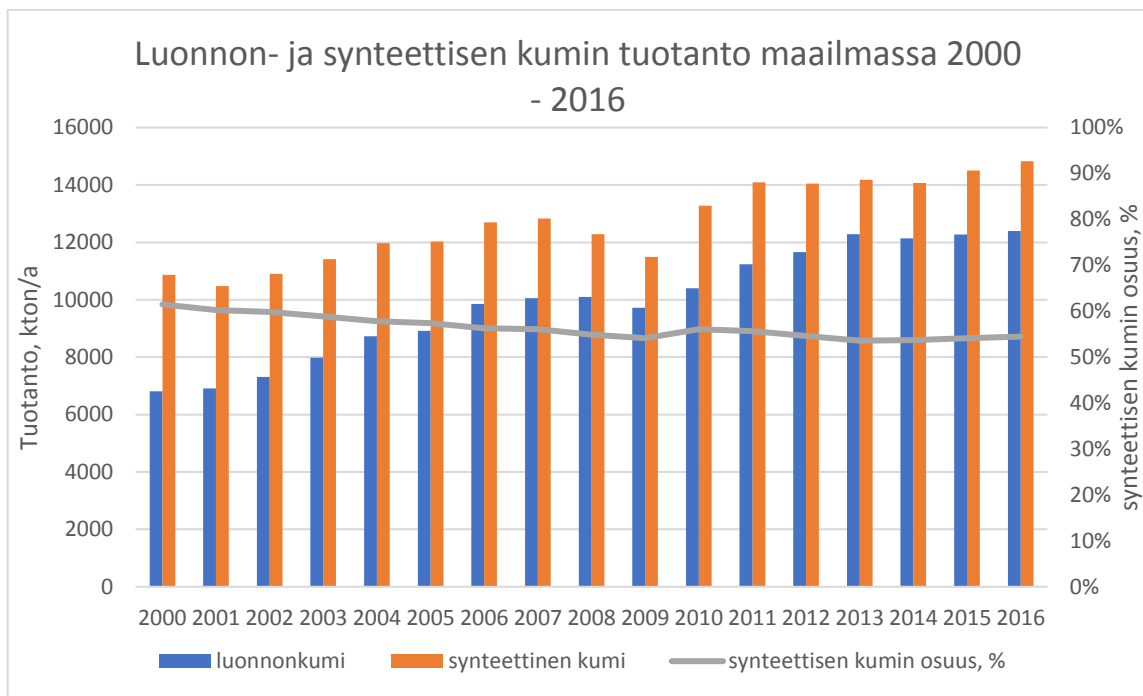
Kuva 12. Muovintuotanto maailmassa, miljoonaa tonnia. (statista 2018a)

Yli 99 % muovista valmistetaan toistaiseksi fossiilista lähteistä – maakaasusta, raakaöljystä ja hiilestä (Plastics Europe 2018). Biomuovilla on siis vielä erittäin pitkä matka kirittävässä, mikäli öljyn käytöstä halutaan luopua kokonaan myös muovin valmistuksen osalta. Biomuoveja voidaan valmistaa hyvin monesta eri kasvi- tai eläinpohjaisesta raaka-aineesta, kuten maissitärkkelyksestä, sokerista, risiiniöljystä, soijaöljystä, kaseiinista ja ligniinistä. Saksan maatalousministeriön alainen uusiutuvien resurssien virasto Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) arvioi julkaisussaan, että pitkän aikavälin skenaariossa, jossa kaikki muovintuotanto olisi biopohjaista, 4 – 7 % kaikesta maailman maatalousmaasta tarvittaisiin biomuovin raaka-aineiden tuotantoon. Maailmassa on maatalousmaata noin viisi miljardia hehtaaria (World Bank b). 4 – 7 % tästä pinta-alasta on noin 2 – 3,5 miljoonaa neliökilometriä. Tätä alaa voi verrata esimerkiksi Meksikon (1 943 945 km²) tai Saudi-Arabian (2 149 690 km²) koko maapinta-alaan. (FNR 2014)

YK:n ennusteen mukaan (United Nations 2017) maailman väkiluku kasvaa vuoteen 2050 mennessä vuoden 2015 tasoon nähden kolmanneksella (7,38 mrd → 9,77 mrd). Kun ottaa huomioon väestönkasvu sekä kehittyvien maiden talouskasvun ja sen tuoman ruokaan käytettävissä olevan rahamäärän kasvamisen, niin voi arvioida, että maatalousmaasta tulee olemaan muutenkin kiihtyvää kilpailua.

Kuten kappaleessa 1.1.2 todettiin, EU-28:n alueella on potentiaalista lisämaata (energiakasvien) viljelyyn noin 1,35 Mha, joka on 0,7 % tämänhetkisestä viljelymaasta. Ainakin Euroopassa on siis varsin niukasti lisämaata tarjolla maanviljelyyn, ja onkin varsin vaikea yhtälö saada nykyiselle tai vain marginaalisesti suuremmalle viljelyalalle saada mahtumaan lisääntyvä ruoankulutus, energiakasvit biopolttoaineiden tuotantoon sekä raaka-aineet biomuovin tuotantoon.

Kuten muovi, myös synteettinen kumi tehdään paljolti fossiilisista raaka-aineista – öljystä, hiilestä, maakaasusta ja asetyleenistä (Ali Shah, Hasan et al. 2013). Synteettisen kumin markkinaosuus on laskenut 2000-luvulla vuosituhannen vaihteen 60 prosentista hieman yli puoleen (statista 2018a, statista 2018b). Kuva 13 näyttää synteettisen ja luonnonkumin tuotannot maailmassa vuosina 2000 – 2016 sekä synteettisen kumin markkinaosuuden.



Kuva 13. Luonnon- ja synteettisen kumin tuotanto maailmassa 2000 - 2016 (statista 2018a, statista 2018b).

Kuvan Kuva 15 mukaisesti bitumi (engl. *asphalt/bitumen*) on raskaimpia raakaöljystä saatavia tuotteita. Bitumin vuosituotanto maailmassa on noin 87 Mton, ja tästä noin 85 % menee asfaltin tuotantoon sideaineeksi. Tyypillisesti asfalttiin menee noin viisi prosenttia bitumia, ja loput kiviainesta sekä lisäaineita. Noin 10 % bitumista menee kattomateriaaliksi, ja loput 5 % sekalaisiin käyttökohteisiin kuten vesi- ja äänieristykseen. Bitumia esiintyy myös luonnossa asfalttijärvissä, joita kutsutaan joskus myös tervahaudoiksi, mutta niitä ei käytetä teollisen mittakaavan tuotantoon. (Asphalt Institute Inc., European Bitumen Association-Eurobitume 2015)

Fossiiliselle bitumille ei ole vielä löytynyt korvaajaa asfaltin valmistuksessa, mutta tutkimusta asiasta löytyy.

1.2. Tutkimusongelmat

Työn tarkoituksena oli tutkia työn pääaihetta, öljyn jalostusta kerosiiniksi, kolmesta näkökulmasta:

1. Onko mahdollista muokata öljynjalostusprosessia siten, että kerosiinia syntyisi nykyistä (alle 10 prosenttia) enemmän? Tämä pienentäisi suoraan lentokoneisiin tarvittavaan kerosiinimäärään vaadittavaa raakaöljyn määrää.
2. Onko mahdollista valmistaa kerosiinia bensiinistä tai muista jakeista, tai käyttää niitä muuten lentoliikenteessä? Mikäli ensimmäinen kohta ei ole mahdollinen, tämä olisi toinen keino valmistaa sama määrä kerosiinia pienemmästä määrästä raakaöljyä. Nämä olisivat edellisen kohdan kanssa parhaita vaihtoehtoja sikäli, että niillä voitaisiin saada rajoitettua lentoliikenteen kasvusta aiheutuvaa öljynkulutusta, mahdollisesti jopa vähennettyä.
3. Onko mahdollista käyttää bensiiniä ja/tai muita jakeita muuhun kuin energiaksi polttamiseen? Tämä olisi tarpeen tilanteessa, jossa tieliikenteessä bensiini- ja dieselkäyttöiset moottorit olisi korvattu laajamittaisesti sähkömoottoreilla/akuilla. Tämä auttaisi omalta osaltaan vähentämään CO₂-päästöjä, joka on pohjimmiltaan syy, miksi öljynkulutusta halutaan vähentää.

1.3. Tutkimuksen tavoite

Työn perustana oli tarve selvittää, missä määrin lentokerosiinin kysynnän määrä ohjaa öljyntuotannon ja -jalostamisen tasoa. Tämän lisäksi työssä arvioitiin kaikkien biopolttoaineiden tuotantomäärää Suomessa vuonna 2030. Euroopan komission vuonna 2011 asettaman (ei-sitovan) tavoitteen mukaan Euroopassa käytettävästä lentopolttoaineista pitäisi olla vuonna 2035 vähintään 25 % uusiutuvista lähteistä, ja vuonna 2050 40 %. Vuoden 2030 tuotantomäärien arviolla voidaan tarkastella, onko Suomessa ylipäätään mahdollista valmistaa tulevaisuudessa komission tavoitteen

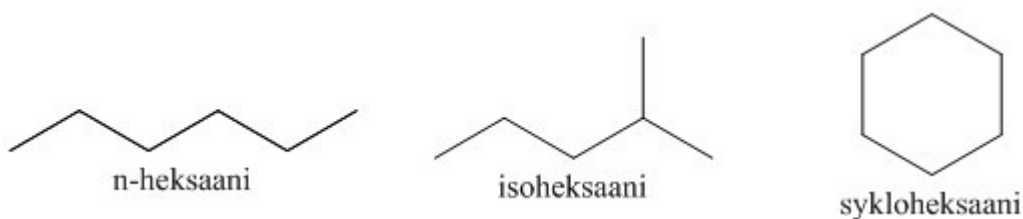
mukaisia määriä biopolttoainetta, vai asettaako esimerkiksi raaka-aineiden saatavuus rajoitteita tälle.

Työhön tarkasteltiin myös pintapuolisesti sitä, mikä on koko öljynjalostusteollisuuden tulevaisuus siinä tilanteessa, että suuri osa öljynjalostajista siirtyy tekemään dieseliä ja bensiiniä biopohjaisista lähteistä. Tässä osiossa tutkittiin, miten siirtymä pois fossiilisista polttoaineista vaikuttaisi muovin ja muiden öljynjalostuksessa syntyvien tuotteiden saatavuuteen.

2. Kerosiinin saannon parantaminen öljynjalostuksessa

2.1. Raakaöljy, sen rakenne ja eri lajikkeet

Raakaöljy koostuu valtaosin erilaisista hiilivedyistä. Hiilivedyt voivat olla joko suoraketjuisia, haaroituneita tai niissä voi olla rengasrakenteita. Nämä hiilivedyt ovat ominaisuuksiltaan liian erilaisia, jotta raakaöljyä voisi käyttää sellaisenaan polttoaineeksi tai muihin käyttökohteisiin. Raakaöljyä jalostetaankin monivaiheisilla prosesseilla erilaisiksi tuotteiksi. Kuvassa Kuva 14 on esimerkki kuuden hiilen hiilivedystä, heksaanista eri muodoissa.



Kuva 14. Heksaanin eri muotoja.

Raakaöljyssä on myös useita muita alkuaineita, kuten typpeä, happea ja rikkiä sisältäviä yhdisteitä, sekä pieniä määriä metalleja. Näistä aineista on lähes pelkästään haittaa, sillä ne saattavat haitata jalostusprosessia tai heikentää saatujen tuotteiden ominaisuuksia.

Nämä aineet pitää saada poistettua raakaöljystä jalostuksen aikana, mikä nostaa tuotantokustannuksia eli laskee jalostettavan raakaöljyn arvoa. Raakaöljylaatua luokitellaan rikkipitoisuuden mukaan makeisiin (matala rikkipitoisuus) ja happamiin (korkea rikkipitoisuus). Tämän lisäksi raakaöljyalaadut luokitellaan tiheyden mukaan kevyisiin ja raskaisiin laatuihin. Kevyistä laaduista saadaan tyypillisesti enemmän ja arvokkaampia jalostustuotteita, kuten bensiiniä ja kaasuöljyä. Niiden arvo on siis suurempi kuin raskaiden laatuja, jotka vaativat monesti myös enemmän jalostamista.

tuotteiden saamiseksi. Taulukkoon Taulukko 5 on koottu muutamien raakaöljylaatujen tuotteiden saantoja. Taulukko 6 esittelee muutamien raakaöljylaatujen rikkipitoisuutta raakaöljyssä ja tislauksessa saatavassa pohjaöljyssä. (Alfke, Irion et al. 2000)

Taulukko 5. Valittujen raakaöljylaatujen tuotejakaumaa (Alfke, Irion et al. 2000).

Laatu, alkuperämaa	Nestekaasu, %	Bensiini, %	Kerosiini, %	Kaasuöljy, %	Pohjaöljy, %
Nigerian light, Nigeria	3	26	14,5	27,5	29
Ekofisk, Norja	3,5	31	13,5	21,5	30,5
Forties, UK	4	22,5	12	22	39,5
Arabian light, Saudi Arabia	1,5	20,5	12	21	45
Alaska, USA	0,5	13,5	11,5	21,5	53
Tia Juana, Venezuela	-	1,5	3,5	14,5	80,5

Taulukko 6. Valittujen raakaöljylaatujen rikkipitoisuus (Alfke, Irion et al. 2000).

Laatu, alkuperämaa	Rikkipitoisuus raakaöljyssä, %	Rikkipitoisuus pohjaöljyssä, %
Ekofisk, Norja	0,1	0,3
Forties, UK	0,3	0,6
Es-Sider, Libya	0,5	0,9
Alaska, USA	1,0	1,5
West Siberia, Venäjä	1,5	2,6
Isthmus, Meksiko	1,6	3,0
Kuwait, Kuwait	2,5	3,8
Arabian light, Saudi Arabia	3,0	4,5

2.2. Kerosiinin valmistus raakaöljystä

2.2.1. Raakaöljystä saatavat tuotteet

Öljystä saatavista tuotteista noin 80 – 90 % menee liikenteeseen ja lämmön- tai sähköntuotantoon polttoaineiksi. Lopuista saadaan tuotteita kuten liuottimia, parafiinivahoja, bitumia ja petrolikoksia. Raakaöljyn sisältämät erilaiset hiilivedyt kiehuvat eri lämpötiloissa. Näihin kiehumispisteiden eroihin perustuu öljynjalostuksen tärkein yksikköoperaatio, jakotislaus. Tislaamalla saadaan erotettua raakaöljystä eri lämpötila-alueilla kiehuvat jakeet. Yksi tapa lajitella jakeet on esitetty taulukossa

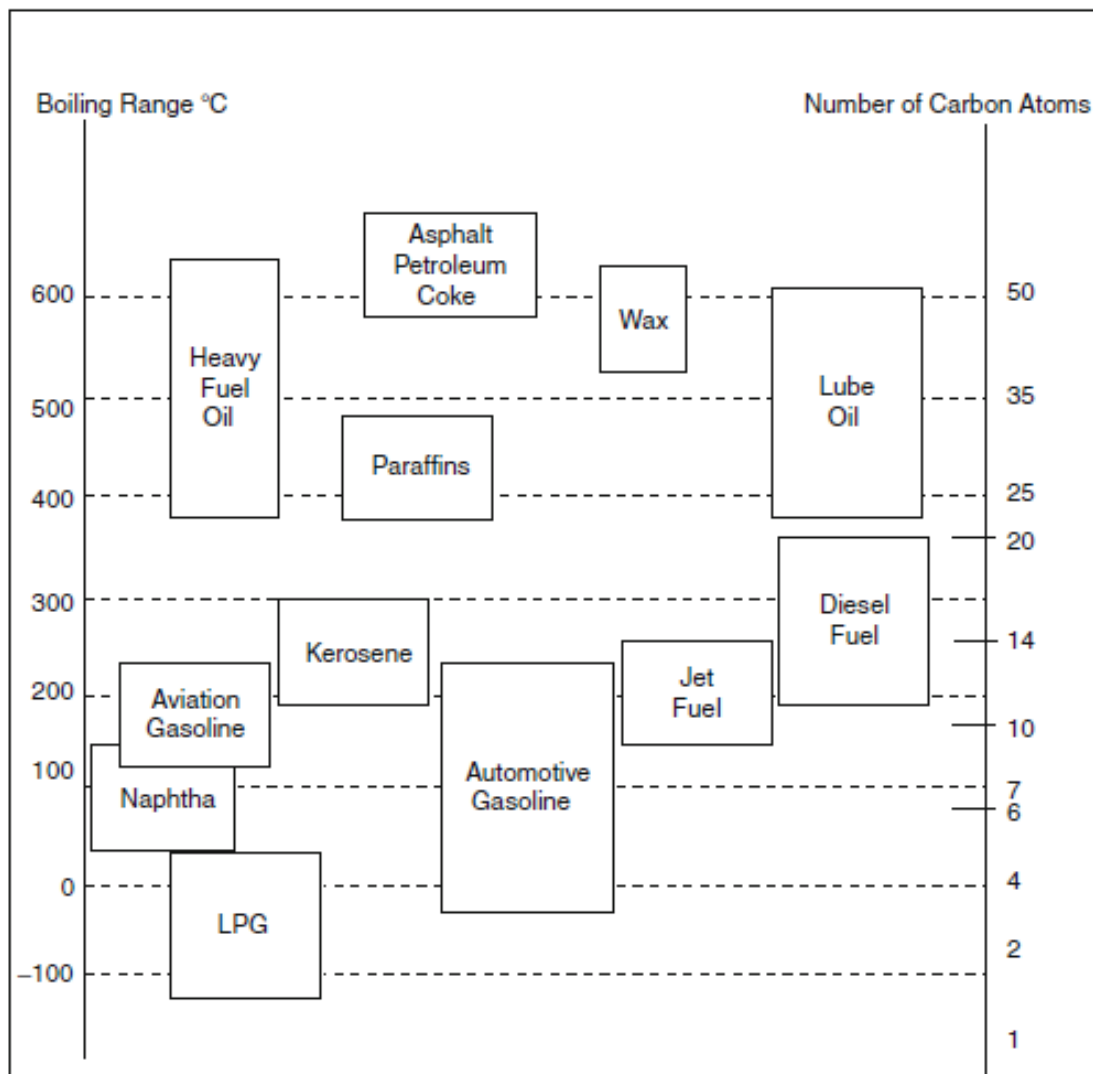
Taulukko 7. (Leffler 2008, Alfke, Irion et al. 2000)

Taulukko 7. Raakaöljyn jakeiden kiehumispistealueita (Leffler 2008).

Kiehumispistealue	Jae
Alle 32 °C	Butaanit ja kevyemmät kaasut
32 – 104 °C	Bensiini
104 – 157 °C	Teollisuusbensiini
157 – 232 °C	Kerosiini
232 – 427 °C	Kaasuöljy
Yli 427 °C	Pohjaöljy

Normaali-ilmanpaineessa tapahtuvan tislauksen jälkeen kiehumatta jäänyt osuus, pohjaöljy (*atmospheric residue*), tislataan tämän jälkeen vakuumitislauksella. Muutkin jakeet menevät ensimmäisen tislauksen jälkeen jatkokäsittelyyn, esimerkiksi teollisuusbensiniä (*naphtha*) saadaan bensiniä ja raaka-ainetta vedyn tuotantoon. Kaasuöljystä (*gas oil*) taas saadaan dieseliä ja polttoöljyä. (Alfke, Irion et al. 2000)

Raakaöljystä saatavien tuotteiden kiehumispisteet korreloivat tuotteiden sisältämien hiilivetyjen hiiliketjujen pituuksien kanssa. Kuvassa Kuva 15 on esitetty yleisimpiä tuotteita kiehumisalueineen ja hiililukuineen (Fahim, Alsahhaf et al. 2010).



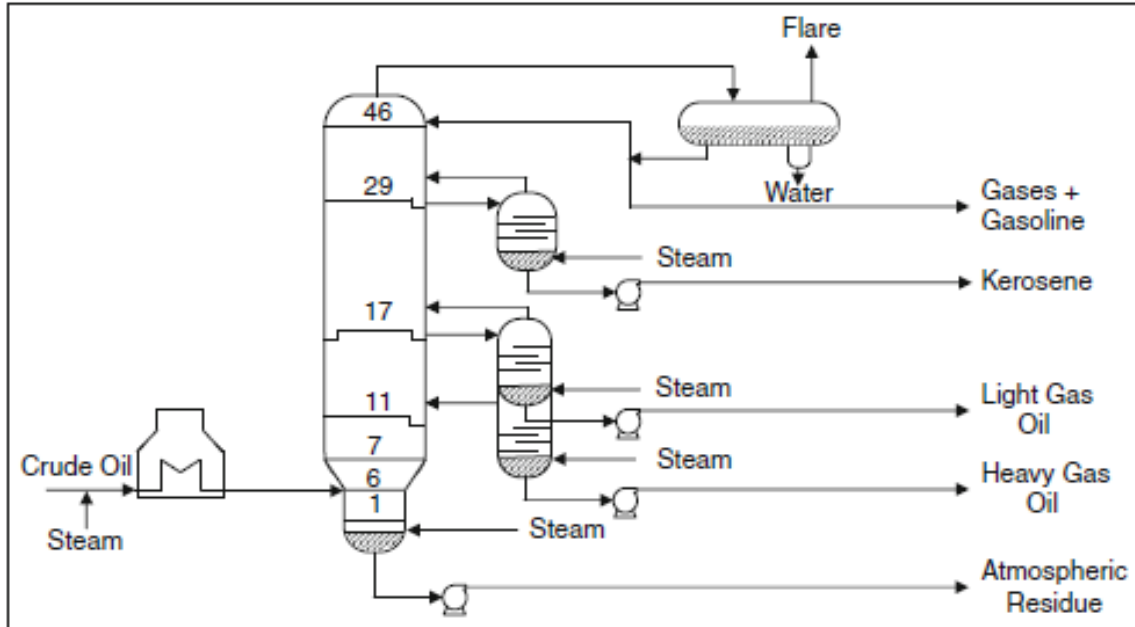
Kuva 15. Öljynjalostuksen tuotteita kiehumisalueineen ja hiililukuineen (Fahim, Alsahhaf et al. 2010).

2.2.2. Öljynjalostus

Muiden epäpuhtauksien lisäksi raakaöljy sisältää myös veteen liuenneita suoloja. Tämä vesi muodostaa öljyn kanssa emulsion, eikä sitä saa erotettua öljystä mekaanisin menetelmin, vaan se poistetaan elektrostaattisella veden erotuksella. Suolanpoiston jälkeen raakaöljy lämmitetään noin 330 – 380 °C lämpötilaan (riippuen raakaöljyn

koostumuksesta), ja se pumpataan jalostuksen ensimmäiseen varsinaiseen vaiheeseen, ilmanpaineessa tapahtuvaan tislaukseen (*atmospheric distillation*). Tislauskolonne on tyypillisesti suuruusluokaltaan 50 m korkea ja 2 – 3 metriä halkaisijaltaan oleva torni, jossa on 30 – 50 välipohjaa. Höyrystynyt osa raakaöljystä nousee kolonnissa ylöspäin, kunnes se jäähtyy ja lauhtuu nesteeksi.

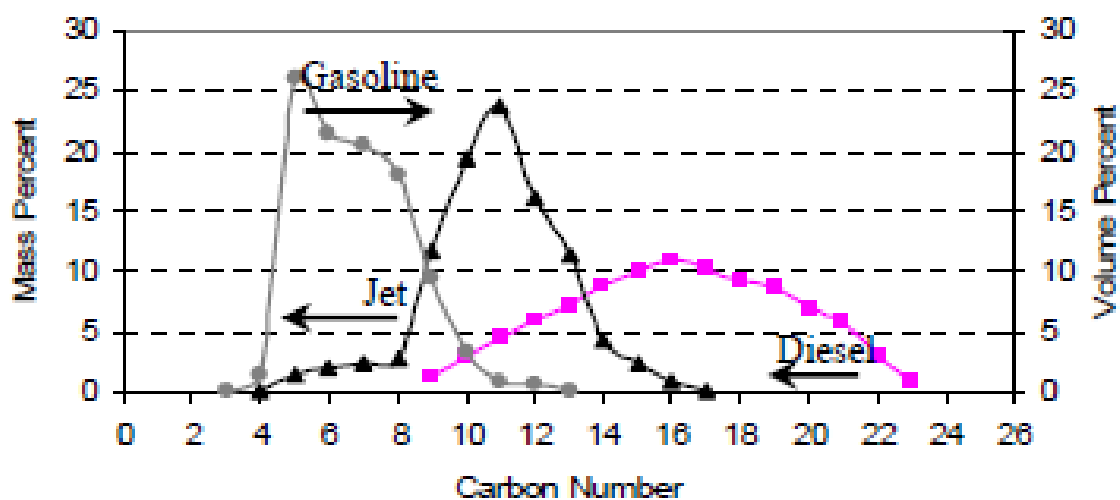
Lyhyimmät hiilivedyt pysyvät kaasumaisina, ja ne poltetaan usein jalostamolla sellaisenaan. Mitä matalampi kiehumispiste, sitä korkeammalle tuote nousee kolonnissa. Valitsemalla miltä välipohjalta tuote otetaan talteen, pystytään säätelemään jakeiden kiehumispistealuetta ja sitä kautta niiden ominaisuuksia. Kuvassa Kuva 16 on esitetty prosessikaavio tyypillisestä (ilmanpaineessa toimivasta) tislauskolonnista. Tislauskolonnin numerot 1 – 46 ovat välipohjien numeroita. (Fahim, Alsahhaf et al. 2010, Alfke, Irion et al. 2000)



Kuva 16. Prosessikaavio tislauskolonnista. (Fahim, Alsahhaf et al. 2010)

Mikäli tislatussa lämpötila nousee liian korkeaksi, raskaammat jakeet alkavat krakkautua lyhyemmiksi hiiliketjuiksi. Tämä alkaa tapahtua noin 400 °C lämpötilassa, joten normaalissa ilmanpaineessa kaikkein raskaimpia hiilivetyjä ei saada tislattua. Ensimmäisen tislauksen jälkeen saatu pohjaöljy pumpataan alipainetislaukseen (*vacuum distillation*)

Kerosiineiksi lasketaan lentopetrolin lisäksi valopetroli, mutta tässä työssä kerosiinilla tarkoitetaan ainoastaan lentopetrolia. Lentoliikenteessä käytettävässä kerosiinissa on lähinnä 8 – 16 hiilen hiilivetyjä (Altin, Eser 2004). Kuvassa Kuva 17 on tyypillisen bensiinin, dieselin ja kerosiinin hiililukujakauma (*carbon number*). Kuvassa bensiini on harmaalla, kerosiini mustalla ja diesel pinkillä.



Kuva 17. Tyypillisen bensiinin, dieselin ja kerosiinin hiililukujakauma (Altin, Eser 2004).

Kerosiinille ei ole yhtä, kaikkialla maailmassa voimassa olevaa standardia. Länsimaissa käytettävät standardit eroavat kuitenkin toisistaan vain hyvin vähän. Yhteistä näille standardeille on hyvin tiukat kriteerit sen suhteen, minkälaista kerosiinin tulee olla. Näistä standardeista tarkemmin kappaleessa 2.3. (Bishop 2011)

2.3. Polttoaineet lentoliikenteessä

Suihkumoottorit yleistyivät lentokoneissa 1940-luvulla, toisesta maailmansodasta alkaen. Nykyisissä suihkumoottoreissa käytetään polttoaineena lähes pelkästään kerosiinia tai kerosiini-bensiini –seoksia. Kerosiinissa on tyypillisesti 8 – 16 hiiltä sisältäviä hiilivetyjä, kerosiini-bensiini -seoksessa 5 – 15 hiiltä sisältäviä (Hemighaus). Merkittävin ero bensiinin ja kerosiinin välillä on bensiinin suurempi haihtuvuus. Tästä aiheutunut kohonnut tulipaloriski tekee sen käsittelystä tankkauksen yhteydessä ja mahdollisista vuototilanteista vaarallisempia. Lentoliikenteen tarvitseman polttoaineen saisi siis pienemmästä määrästä raakaöljyä, jos myös bensiiniä käytettäisiin kerosiinin ohella. Lähes kaikkialla pyritään kuitenkin nykyään enemmän lisäämään turvallisuutta ja pienentämään onnettomuuksien todennäköisyyksiä, joten on vaikea nähdä, että lentoliikenteessä hyväksyttäisiin siirtyminen vastakkaiseen suuntaan.

Kerosiini-bensiini –seosta (Jet B, *wide-cut kerosene*) käytetään siviili-ilmailussa enää hyvin vähän, lähinnä erittäin kylmissä olosuhteissa seoksen hyvin kylmään ilmanalaan sopivien ominaisuuksien johdosta. (Bishop, Hemighaus) Liitteeseen 4 on koottu vaadittuja ominaisuuksia siviili-ilmailussa käytettävälle Jet A-1 -tyyppiselle kerosiinille (Bishop). Kerosiinille on asetettu hyvin monia kriteerejä, joita sen tulee täyttää. Kriteerit liittyvät mm. rikkipitoisuuteen, aromaattisten yhdisteiden osuuteen, tiheyteen, jäätymispisteeseen ja savuamispisteeseen.

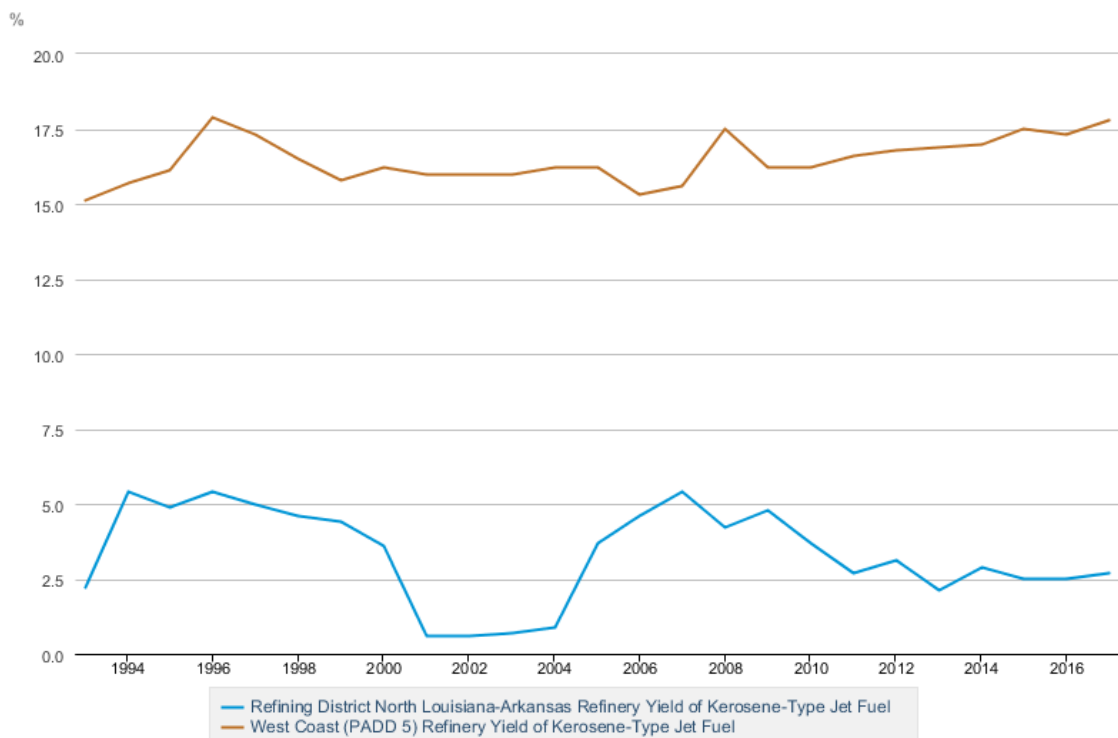
2.4. Kerosiinin saannon parantaminen jalostuksessa

Vastauksena tutkimusongelman toiseen kohtaan, onko mahdollista valmistaa kerosiinia bensiinistä tai muista jakeista, tai käyttää niitä muuten lentoliikenteessä: käytännössä milloinkaan ei ole kannattavaa valmistaa raakaöljystä ensin bensiiniä tai dieseliä ja sen jälkeen näistä kerosiinia. Kerosiinin osuuden lisääminen öljynjalostuksen

tuotejakaumassa tapahtuisi siis aina jo jalostusvaiheessa. Tässä työssä tarkastellaan siis projekteja, joissa on pyritty kasvattamaan kerosiinin osuutta jo jalostusvaiheessa.

Kuten taulukosta Taulukko 2 sivulla 9 nähdään, kerosiinin (valopetroli mukaan luettuna) osuus OECD-maiden kaikista jalostustuotteista oli vuosina 2015 – 16 hieman alle 10 %. Kerosiinin pieni osuus ei kuitenkaan ole johtunut siitä, etteikö sitä saisi valmistettua nykyistä enemmän raakaöljystä. Öljynjalostajat ovat vain tehneet enemmän voittoa tuotejakaumalla, jossa esimerkiksi bensiinin ja dieselin osuus on ollut suurempi. Tähän vaikuttavat tuotteiden kysyntä (bensini ja diesel laskussa, kerosiini kasvussa) ja tarjonta sekä näistä ja raakaöljyn hinnasta johtuva tuotekohtainen jalostusmarginaali. Kerosiinin osuus jalostamoiden tuotteista voi vaihdella hyvinkin paljon, riippuen paikallisesta kysynnästä, jalostettavan raakaöljyn koostumuksesta ja jalostusmarginaaleista.

Kuva 18 näyttää kahden alueiden välisiä eroja Yhdysvalloissa vuosina 1993 – 2017: ylempi käyrä kuvaa länsirannikon aluetta, johon kuuluvat Washingtonin, Oregonin, Kalifornian, Nevadan, Arizonan, Alaskan ja Havaijin osavaltiot, alempi käyrä kuvaa aluetta johon kuuluvat pohjois-Louisiana ja Arkansasin osavaltio. Länsirannikon alueella kerosiinin osuus on vaihdellut 15 – 18 % välillä, kun taas pohjois-Louisianan ja Arkansasin alueella osuus on ollut useampana vuonna alle yksi prosentti, vaihdellen välillä 0,6 – 5,4 %. (EIA 2018)



Source: U.S. Energy Information Administration

Kuva 18. Lentokerosiinin osuus kahdella jalostusalueella Yhdysvalloissa vuosina 1993 – 2017 (EIA 2018).

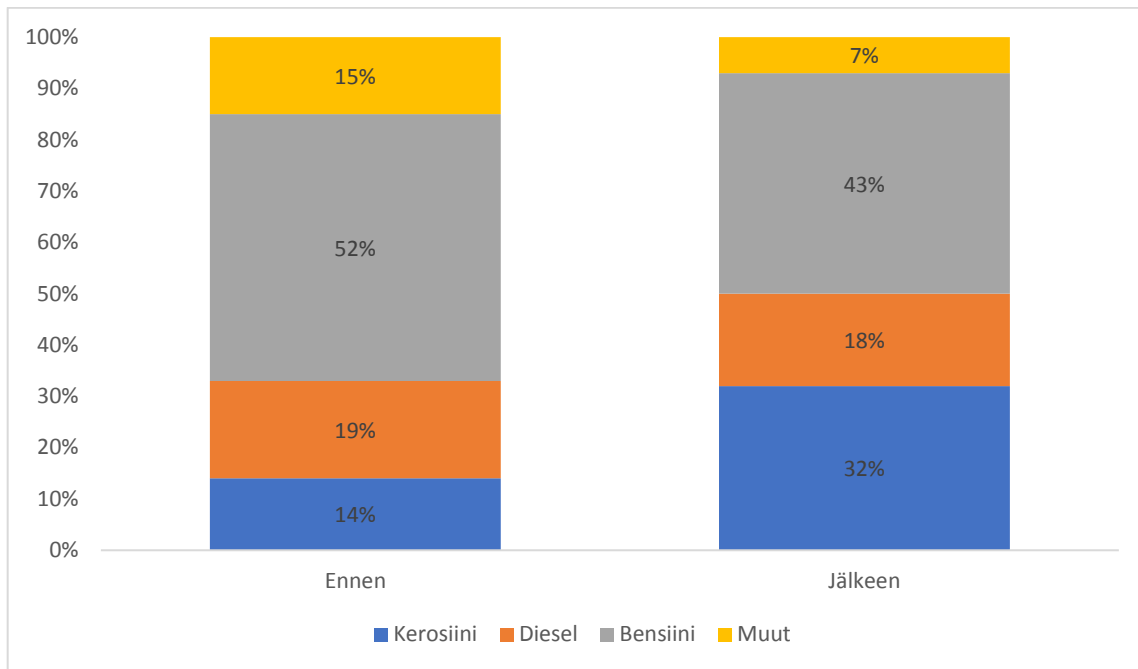
Teknisesti voi olla mahdollista valmistaa raakaöljystä hyvinkin paljon kerosiinia yhdistelemällä lyhyempiä hiiliketjuja ja pilkkomalla pidempiä sopivan mittaisiksi, mutta tähän voisi kulua enemmän energiaa kuin näin valmistettavista kerosiinimolekyyleistä saisi, joten käytännössä tämä ei ole kannattavaa. Se missä kannattavan saannon raja menee, riippuu jalostamalla valmistettavien tuotteiden hinnoista ja käytettävän raakaöljyn koostumuksesta, joten tarkkaa lukua on mahdoton antaa. Tuotteiden hintoihin vaikuttavia tekijöitä voi kuitenkin yrittää analysoida. Lähivuosikymmeninä bensiinin ja dieselin kysyntää vähentäne merkittävästi eri maiden asettamat bensiini- ja dieselautojen myyntikiellot, mikäli nämä toteutuvat niin tiukkoina kuin vuonna 2018 niitä on suunniteltu. Ainakin Tanska (2030 alkaen), Ranska ja Britannia (2040 alkaen) ovat suunnitelleet kieltoja. (HS 2018b)

Seuraavissa kappaleissa esitellään muutamia projekteja, joissa on pyritty parantamaan kerosiinin saantoa. Kappale 2.4.1 kertoo tapauksesta, jossa lentoyhtiö Delta Air Lines osti kokonaisen öljynjalostamon. Kappaleissa 2.4.2 - 2.4.4 käsitellään tieteellisiä artikkeleita liittyen kerosiinin saannon parantamiseen.

Delta Air Linesin tapaus oli ainoa isompi kaupallinen projekti, joka löytyi etsittäessä materiaalia tätä diplomityötä varten. Samoin tutkimusartikkelit olivat jokseenkin ainoita, jotka löytyivät kuukausien etsimisen aikana. Tästä päätellen valmistetun kerosiinin määrän kasvattaminen ei ole aihe, jota olisi tutkittu kovin paljon ainakaan toistaiseksi. Kerosiinin valmistus raakaöljystä on erittäin monimutkainen ja monivaiheinen prosessi. Saatavilla olevien tietojen perusteella on mahdotonta sanoa, kuinka suuri vaikutus kerosiinin valmistukseen erilaisilla jalostamoilla ympäri maailman on sillä, että laboratoriossa saadaan desilitrasta vakuumikaasuöljyä kolmannes enemmän kerosiinia kierrätysvirtoja optimoimalla (kappale 2.4.4). Voidaan vain todeta, että vähintään jonkinlaisia parannuksia on mahdollista tehdä, ja että asiasta ei löydy kovin paljoa tutkimusta tällä hetkellä.

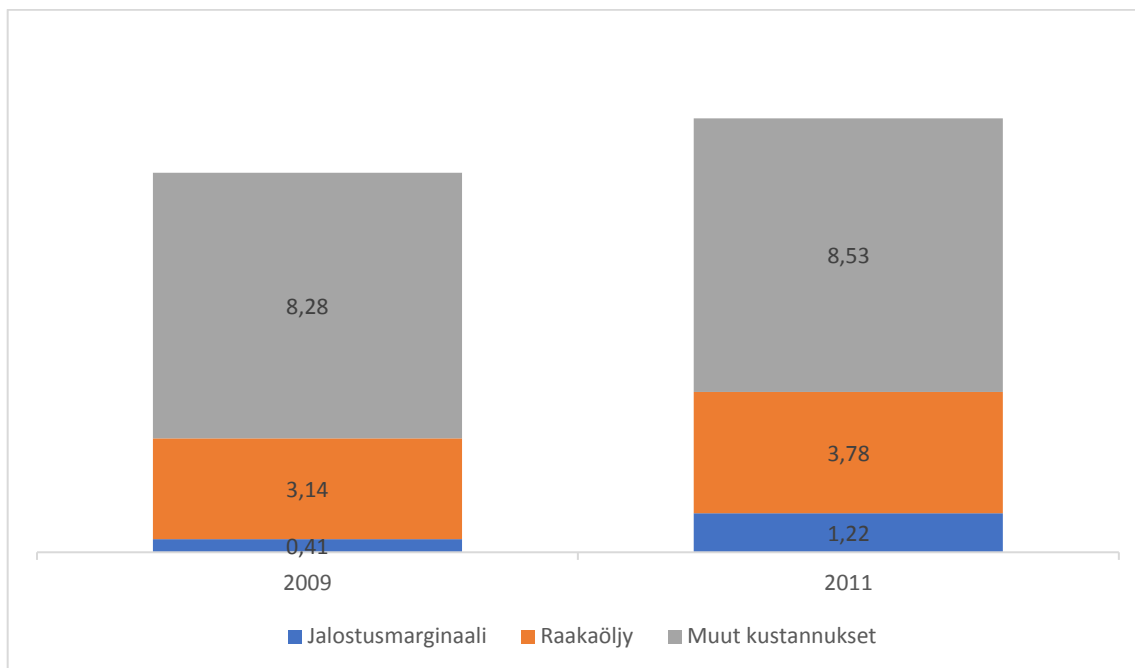
2.4.1. Delta Air Lines ja Trainerin jalostamo

Yhdysvaltalainen lentoyhtiö Delta Air Lines osti vuonna 2012 Philadelphian alueella kuukausia käyttämättä olleen Trainerin öljynjalostamon (EIA 2012). Jalostamon kapasiteetti oli ainakin tuohon aikaan 185 000 barreliä päivässä (*barrels per day*, bpd). Delta maksoi Phillips 66:lle jalostamosta 180 miljoonaa dollaria, josta 30 miljoonaa oli Pennsylvanian osavaltion maksamaa tukea. Tämän lisäksi Delta teki jalostamoon muutostöitä 100 miljoonan dollarin edestä maksimoidakseen kerosiinin tuotantoa. Muutostöillä Delta pyrki nostamaan kerosiinin osuutta jalostamon tuotteista 14 prosentista jopa 32 prosenttiin (Kuva 19). (Delta Air Lines 2012)



Kuva 19. Trainerin jalostamon tuotejakauma ennen ja jälkeen muutostöiden (Delta Air Lines 2012).

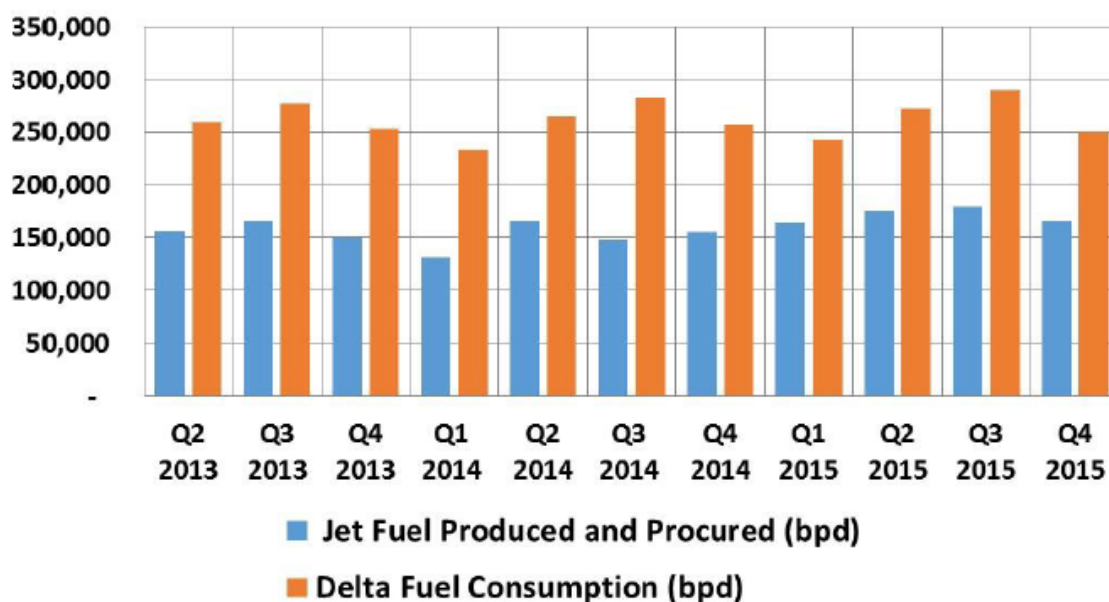
Yhdysvaltain arvopaperimarkkinoita valvovalle elimelle (*United States Securities and Exchange Commission, SEC*) antamassaan selvityksessä Delta ennusti saavuttavansa vuosittain 300 miljoonan dollarin säästöt. Lisäksi investointi pienentäisi riskiä sille, että jalostuskapasiteetin vähentäminen Yhdysvaltojen itärannikolla aiheuttaisi tarjonnan vähenemistä ja sitä kautta painetta hinnankorotuksille. Vuonna 2012 Deltan polttoainelasku oli yhteensä 12 miljardia dollaria, josta 2,2 miljardia meni jalostusmarginaalien maksamiseen. Deltan tarjottua istuinmailia kohti laskettuna jalostusmarginaalin hinta kasvoi vuosina 2009 – 2011 73 %, kun raakaöljy kallistui vain 10 % (Kuva 20). (Delta Air Lines 2012)



Kuva 20. Deltan kustannusrakenne tarjottua istuinmailia kohti (Delta Air Lines 2012).

Deltan suunnitelmana oli käyttää itse jalostamolla valmistettu 52 000 bpd kerosiinia, ja vaihtaa 70 000 bpd bensiiniä ja dieseliä Phillips 66:n kanssa vastaavaan määrään kerosiinia, sekä 50 000 bpd bensiiniä ja muita tuotteita BP:n kanssa vastaavaan määrään kerosiinia. Mikäli bensiinin ja kerosiinin/dieselin jalostusmarginaalit ovat kääntäen verrannollisia toisiinsa kuten Delta selvityksessään ilmaisee, tämän tyyppinen järjestely suojaisi hyvin lentoyhtiötä jalostusmarginaalien muutoksilta. Bensiinin jalostusmarginaalin laskiessa Delta hyötyy tilanteesta saadessaan halventuneella bensiinillä kallistunutta kerosiinia. Bensiinin kallistuessa kerosiini halventuu, joten Delta pystyy ostamaan kerosiinia halvemmalla markkinoilta. Trainerin jalostamolla valmistettu sekä vaihtokaupoilla saatu kerosiini kattaisivat yli 80 % Deltan kotimaisesta kerosiinin tarpeesta, joten onnistuessaan lentoyhtiö olisi varsin turvattu kerosiinin hinnan volatiliiteettiä vastaan. (Delta Air Lines 2012)

Kerosiinin tuotanto ei kuitenkaan käynnistynyt jalostamolla odotusten mukaisesti. Kuva 21 näyttää kerosiinin tuotannon Trainerin jalostamolla sekä jalostamon muista tuotteista vaihtokaupassa saadun kerosiinin (sininen palkki) ja Deltan kerosiinin kokonaiskulutuksen (oranssi palkki) vuoden 2013 alkupuolelta vuoden 2015 loppuun. Kerosiinin tarkkaa osuutta lähteestä ei näe, mutta ainakin kokonaistuotanto on vuosina 2013 – 2014 jäänyt selvästi vajaaksi 185 000 bpd maksimikapasiteetista. Vuoden 2015 toisella ja kolmannella neljänneksellä on päästy jo lähelle tavoitetta. Myös FlightGlobal uutisoi toukokuussa 2013 Trainerin jalostamon olleen alle tavoitteen. Delta oli tuolloin ilmoittanut tekevänsä lisää muutoksia jalostamoon, joiden pitäisi nostaa kerosiinin tuotantokapasiteetti 40 000 barreliin päivässä. Tämä vastaa hieman alle 22 % maksimikapasiteetista, ja on vielä kaukana alun perin tavoitteena olleesta 32 % osuudesta.



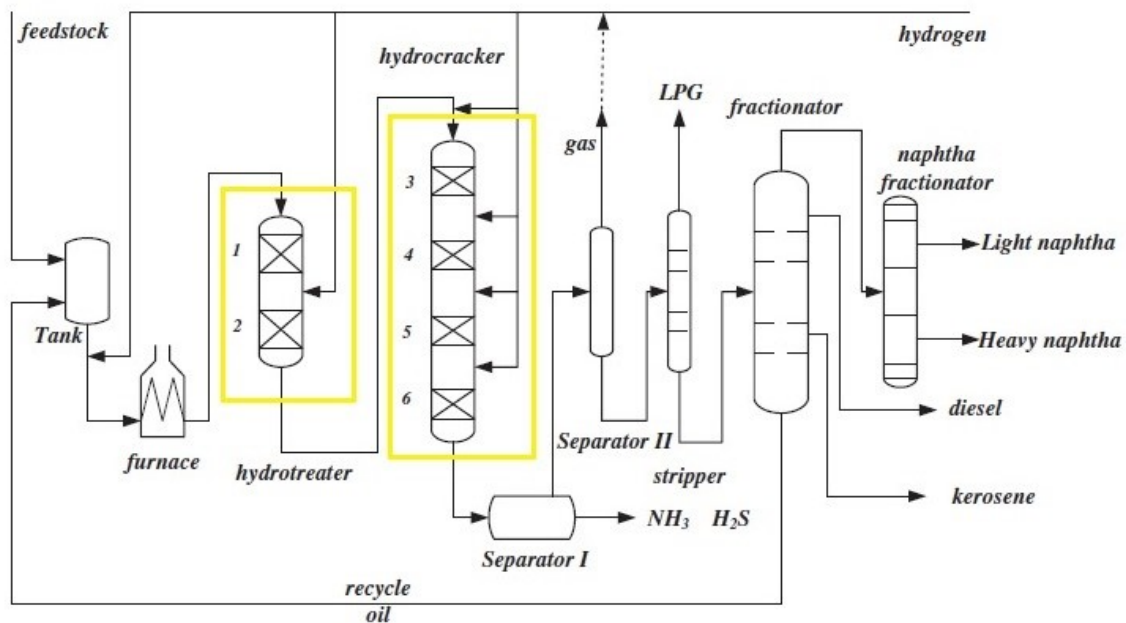
Kuva 21. Kerosiinin tuotanto ja hankinta Trainerin jalostamolla sekä Deltan kerosiinin kokonaiskulutus.

Ilman tarkempaa tietoa jalostamon tuotejakaumasta muutostöiden jälkeen on vaikea arvioida, kuinka hyvin yritys nostaa kerosiinin osuutta onnistui. Vähintäänkin voidaan

todeta, että Delta on uskonut idean olevan siinä määrin mahdollinen, että siihen kannattaa sijoittaa satoja miljoonia dollareita pääomaa.

2.4.2. Vetykrakkeriysikön optimointi simuloimalla

Zhou et al. tutkivat dieselin ja kerosiinin saannon parantamista vetykrakauksessa. Tutkimus tehtiin simuloimalla kiinalaisen öljy-yhtiö Sinopecin vetykrakkeriyksikköä, jonka tuotantokapasiteetti on 1,2 Mton vuodessa. Kuva 22 esittää yksikön virtauskaaviota. Kuvaan on merkitty keltaisella viivalla prosessin olennaisimmat osat vetykäsittelyreaktori (*hydrotreater*) ja vetykrakkeri (*hydrocracker*). Prosessissa vetykäsittelyreaktoriin syötetään vetyä ja raskasta vakuumikaasuöljyä (*heavy vacuum gas oil*, HVGO), jonka kiehumispistealue on 232 – 587 °C. Lämpötila on vetykäsittelyssä 357 – 392 °C ja vetykrakkerissa 372 – 397 °C. Paine on vetykäsittelyssä 130,3 atm ja vetykrakkerissa 130,1 atm. Vetykäsittelyreaktorissa on kaksi pohjaa ja vetykrakkerissa neljä.



Kuva 22. Vetykrakkerin virtauskaavio (Zhou, Lu et al. 2011).

Prosessia simuloidessa tehtiin seuraavat oletukset:

1. Vetykrakkaus on ensimmäisen asteen pseudohomogeeninen reaktio. Koska vetyä on saatavilla ylimäärin, vedyn pitoisuus ei vaikuta vetykrakkautumisen nopeuteen.
2. Fluidit kulkevat reaktorissa tulppavirtauksena.
3. Lämpöhäviöt ovat minimaalisia ja reaktorit toimivat adiabaattisissa olosuhteissa.
4. Prosessi on steady state -tilassa.
5. Prosessissa ei ole diffuusiovastusta.
6. Kierrätysvirrat ja vedyn syöttövirrat ovat puhdasta vetyä.
7. Kaikki öljytuotteet reaktorissa ovat nestefaasissa.
8. Kokonaismassavirran ja sen lämpökapasiteetin tulojen summa on vakio kullekin pohjalle.
9. Rikki- ja typpi -komponentti mallinnetaan yhtenä yksikkönä.

Prosessia simuloitiin 10 parametrin avulla. Näistä neljä liittyi tuotejakaumaan, kolme reaktiokinetiikkaan ja kolme reaktion aktivointienergiaan. Tarkempi kuvaus parametreista on liitteessä 2. Prosessia optimoidessa pyrittiin maksimoimaan joko dieselin tai kerosiinin saantoa (kaksi erillistä simulointia) löytämällä olosuhteet (käytännössä lämpötila), jossa saanto olisi suurimmillaan.

Koska tuotteen laadulle ja toiminnan turvallisuudelle on hyvin tiukat säädökset, ja vetykrakkeriyksikkö on osa isompaa kokonaisuutta jalostamolla, sen toimintaa pystytään säätämään vain tiukkojen rajojen puitteissa. Simuloinnissa vetykrakkerireaktorille asetettiin seuraavat rajoitukset: 1) Kunkin pohjan lämpötila saa vaihdella vain noin $\pm 1\%$ normaalitilaan verrattuna, sillä liian alhainen lämpötila johtaa raaka-aineen alhaiseen konversioon, liian korkea lämpötila taas johtaa halutun lopputuotteen muuttumiseksi muiksi tuotteiksi. 2) Typpikomponentin pitoisuus saa olla korkeintaan $70 \mu\text{g g}^{-1}$

vetykäsittelyreaktorin tuotevirrassa, muuten vaarana on katalyytin myrkytys. 3) Raaka-aineen kerran läpi -konversion tulee olla välillä 55 % ja 70 %, muuten tuotanto tulee liian kalliiksi tai kaasumaisen tuotteen saanto kasvaa liian suureksi. 4) Vedyn syöttö tulee olla kullekin pohjalle tiettyjen rajojen välillä: 1. pohja $10\,000 - 20\,000 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$, 2. pohja $20\,000 - 35\,000 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$, 3. pohja $10\,000 - 20\,000 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$, 4. pohja $10\,000 - 22\,000 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$, 5. pohja $10\,000 - 20\,000 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$.

Koska virtauksen suuruutta ja HVGO:n syötön lämpötilaa ei voida säätää, vetykrakkeriyksikössä reaktiolämpötilaa säädellään vedyn syöttömäärällä, joten käytännössä saantoa säädellään vedyn syöttömääriä eri pohjille säätelemällä. Prosessia simuloitiin kahdella menetelmällä, geneettisellä algoritmilla (*genetic algorithm*, GA) ja sekvenssisellä neliöohjelmoinnilla (*sequential quadratic programming*, SQP). Tulokset on koottu taulukkoon liitteessä 3. Kerosiinin saantoa saatiin simuloinnissa parannettua GA:lla 0,96 %-yksiköllä ja SQP:llä 1,09 %-yksiköllä. Tulosten suhteellinen virhe on artikkelin mukaan alle neljä prosenttiyksikköä. Lähtökohta kerosiinin saannolle oli 20,05 %, eli yhden prosenttiyksikön parannus vastaisi noin viiden prosentin suhteellista parannusta saantoon. Artikkelin pohjalta on vaikea arvioida missä määrin saannon parantaminen onnistuisi myös oikeassa jalostamossa tai olisiko vastaava parannus saavutettavissa muissa jalostamoissa. (Zhou, Lu et al. 2011)

2.4.3. Keskitisleiden jalostus muiksi tuotteiksi

Zhang et al. (Zhang, Zhang et al. 2017) ovat koonneet yhteen artikkelissaan teknologisia ratkaisuja, joilla keskitisleitä voidaan jalostaa muiksi tuotteiksi, kuten kerosiiniksi, raskaaksi teollisuusbensiiniksi, nestekaasuksi, BTX-kemikaaleiksi (bentseeni, tolueeni, ksyleeni) sekä parempilaatuisiksi dieseljakeiksi.

Kiinalaisen öljy- ja kaasujätti Sinopecin tutkimusinstituutti SINOPEC Research Institute of Petroleum Processing (RIPP) on kehittänyt teknologiaa, keskisuuren paineen vetyjalostusta (*medium-pressure hydro upgrading*, MHUG). Prosessissa käytettävä paine on suuruusluokkaa 4,5 – 12 MPa. Tällä teknologialla on kuitenkin vielä ongelmia kerosiinin valmistuksessa. Kyseisellä prosessilla valmistetun kerosiinin savuamispiste jää liian matalaksi, eikä se täytä kaupallisessa lentoliikenteessä käytetylle kerosiinille asetettuja tiukkoja vaatimuksia. Artikkelin perusteella saa kuvan, että prosessissa käytetyn katalyytin aktiivisuuden laskiessa lämpötila nousee, joka hidastaa aromaattisten yhdisteiden tyydyttymistä. Paine jää myös liian matalaksi ja olosuhteet ovat riittämättömät korkealaatuisen kerosiinin tuotantoon.

Sinopecin niin ikään omistama Fushun Research Institute of Petroleum and Processing (FRIPP) on kehittänyt prosessia, jolla saataisiin pienennettyä dieselin osuutta jalostuksessa. Kun FD2J-prosessiin (*FRIPP diesel to jet fuel*) käytetään raaka-aineena kaasuöljyn suoratislettä (*straight-run gas oil*, SRGO), päätuotteina saadaan teollisuusbensiniä, lentopolttoaineita (artikkeli puhuu näistä monikossa, mutta jää epäselväksi tarkoitetaanko tässä eri standardien mukaisia kerosiineja vai jotain muuta) ja dieseliä. Kun prosessissa käsitellään kapean kiehumispistealueen dieseliä, niin teollisuusbensiniin saanto on 35,51 % ja kerosiinin 62,86 % (Taulukko 8).

Taulukko 8. FD2J-prosessin raaka-aineen ja tuotteiden ominaisuuksia.

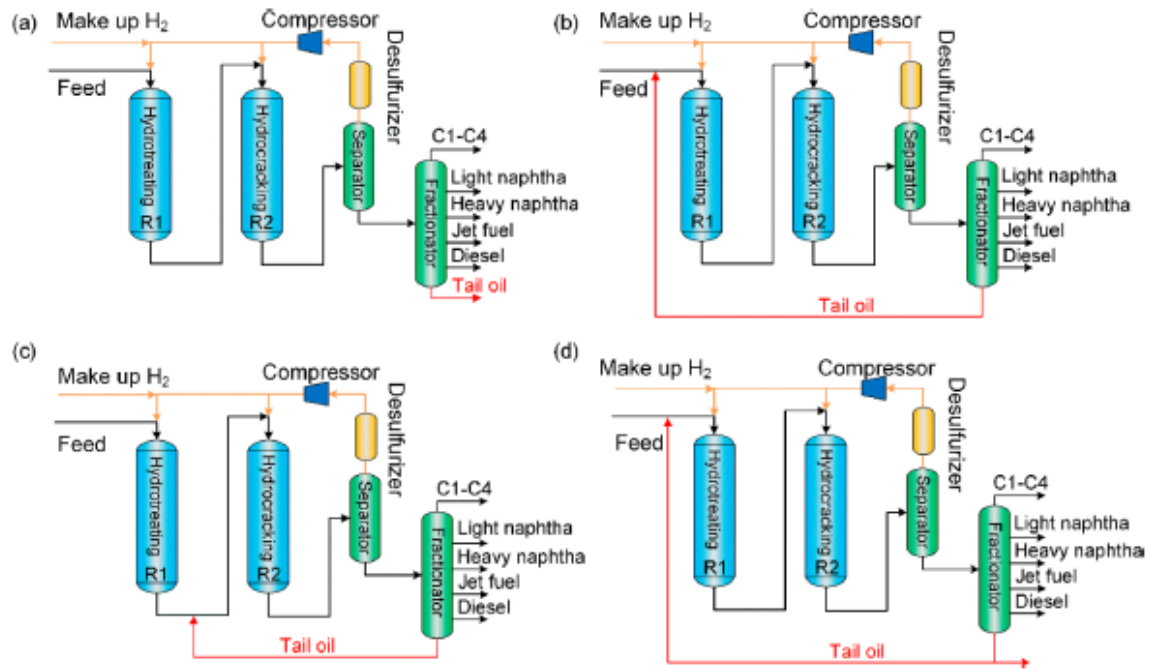
ominaisuus	raaka-aine	teollisuusbensiini	kerosiini
tiheys, g/cm ³	0,8346	0,7111	0,8077
kiehumispistealue, °C			
HK/30 %	228/259	48/71	145/193
50 %/70 %	266/273	96/103	222/246
90 %/KK	281/294	155/166	267/285
saanto, %	-	35,51	62,86
jäätymispiste, °C	-18,6		-49
savuumispiste, mm	18,6		22,8

Myös tällä prosessilla valmistetun kerosiinin savuumispiste jää liian matalaksi alhaisen paineen takia. Kerosiini vaatii täten sekoituksen parempilaatuiseen kerosiiniin ennen käyttöä. Parantaakseen näin valmistetun kerosiinin laatua, FRIPP on kehittänyt prosessia josta se käyttää lyhennettä FDHC (FRIPP diesel hydrocracking technology). Prosessi sisältää yhden ylimääräisen vetykäsittelyreaktorin ennen jakotislauskolonnia. Yhdessä sopivan katalyytin kanssa tämä käsittely vähentää aromaattisten yhdisteiden määrää kerosiinissa 6,7 %, mikä taas nostaa savuumispistettä.

2.4.4. Pohjaöljyn kierrätyksen merkitys saannolle

Peng et al. (Peng, Cao et al. 2018) tutkivat pohjaöljyn kierrätyksen vaikutusta kerosiinin ja raskaan teollisuusbensiinin saantoon ja laatuun. Tutkimus tehtiin laboratoriomittakaavassa, ja käytetyn näytteen määrä oli 100 ml. Raaka-aineena käytettiin iranilaista vakuumikaasuöljyä. Tislausta tehtiin neljällä eri konfiguraatiolla kuvan Kuva 23 mukaisesti. SSOTP:ssa (*single stage once through process*) pohjaöljyä (*tail oil*) ei kierrätetä (a). FRTHT:ssa (*full tail oil recycled to hydrotreating reactor*) pohjaöljy kierrätetään vetykäsittelyreaktoriin (*hydrotreating*) (b). FRTHC:ssa (*full tail oil recycled to hydrocracking reactor*) pohjaöljy kierrätetään vetykrakkeriin (c). PRTHC:ssa (*partial tail*

oil recycled to hydrotreating reactor) osa pohjaöljystä kierrätetään vetykäsittelyreaktoriin (d).



Kuva 23. Neljä erilaista tapaa kierrättää pohjaöljyä. (Peng, Cao et al. 2018)

Artikkelin mukaan prosessit joissa pohjaöljy kierrätetään takaisin vetykäsittelyyn tai -krakkaukseen, FRTHT ja FRTHC, tuottivat parhaan saannon kerosiinille. Näiden kahden välillä ei ollut suurta eroa. Taulukkoon Taulukko 9 on koottu eri konfiguraatioilla valmistetun kerosiinin ominaisuuksia.

Taulukko 9. Eri kierrätyskonfiguraatioilla valmistetun kerosiinin ominaisuuksia. (Peng, Cao et al. 2018)

Konfiguraatio	SSOTP	FRTHT	FRTHC	PRTHT
Saanto, %	33,72	45,99	46,71	36,59
Tiheys (20 °C), g*cm ⁻³	0,8065	0,7891	0,7942	0,8054
Tislaus, °C				
IBP/10 %	145/162	144/157	146/163	148/163
30 %/50 %	177/196	167/184	176/194	179/199
70 %/90 %	218/244	204/246	216/244	221/246
98 %/EBP	254/261	259/266	254/262	255/262
Viskositeetti (20 °C), mm ² *s ⁻¹	1755	1599	1620	1680
Jäätymispiste, °C	< -60	< -60	< -60	< -60
Leimahduspiste, °C	44	42	44	45
Savuamispiste, mm	26	33	29	26

Tuloksista näkee, että pohjaöljyn kierrätyksellä on suuri merkitys kerosiinin saannolle. Kierrättämällä pohjaöljy takaisin vetykäsittelyyn tai -krakkaukseen saadaan tislauksesta yli kolmannes enemmän kerosiinia kuin ilman kierrätystä. Lisäksi savuamispiste on hieman korkeampi näin saadulla kerosiinilla, mikä on toivottu asia.

3. Vaihtoehtoiset käyttökohteet bensiinille ja muille jakeille

3.1. Mahdolliset käyttökohteet

Tässä kappaleessa kuvataan, mihin muuhun raakaöljyn jakeita voisi käyttää kuin energiaksi polttamiseen. Raakaöljyä käytetään lähes 90 miljoonaa barreliä päivässä, mikä vastaa noin 15 miljoonaa tonnia päivässä. Verrattuna koko maailman muovin tuotantoon, hieman yli 300 miljoonaa tonnia vuodessa (European Bioplastics 2017), muutamassa viikossa maailmassa käytetyn raakaöljyn massa vastaa koko vuoden muovituotannon määrää. Ainakin läntisessä maailmassa muovin kulutusta pyritään hyvin voimakkaasti vähentämään, joten muovin tuotannon lisääminen sotisi tätä periaatetta vastaan. Vedyn tuotanto voisi olla sikäli hyvä kohde raakaöljyn ylijääneille jakeille, että ihmisillä on jatkossakin tarve liikkua autoilla, ja niiden liikuttamiseen tarvitaan energiaa. Vety olisi lisäksi saasteeton energiamuoto ainakin siinä mielessä, että autojen pakoputkista pääsee ilmakehään vain vesihöyryä hiilidioksidin sijasta. Toinen suuri käyttökohde voisi olla vedyn käyttö energian varastointiin, kuten seuraava kappale esittelee.

Konsulttiyhtiö E4techin yhteistyössä skotlantilaisten julkisen sektorin ja teollisuuden toimijoiden kanssa tekemän selvityksen (E4tech 2016) mukaan vetyä voidaan käyttää liikenteen polttoaineen lisäksi myös energian varastointiin. Vetyä voitaisiin varastoida esimerkiksi maanalaisiin suolaluoliin tai tyhjentyneisiin maakaasuesiintymiin. Näihin varastoitua vetyä voitaisiin käyttää energiantuotannossa tasaamaan kausittaista kysynnän vaihtelua. Raportissa viitataan brittiläisen ETI:n (Energy Technologies Institute) raporttiin, jonka mukaan kuuteen tällaiseen luolaan voitaisiin varastoida jopa 0,5 TWh edestä vetyä.

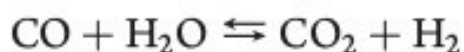
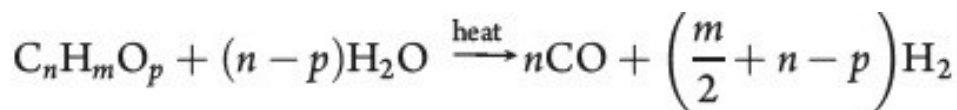
IEA:n raportin (IEA 2015) mukaan polttokennoautojen määrä on erittäin voimakkaassa kasvussa. Taulukko 10 kuvaa polttokennoautojen määrää Euroopassa, Japanissa, Etelä-Koreassa ja Yhdysvalloissa. Taulukossa on tilanne vuodelta 2014, sekä tavoitellut määrät vuosille 2015 sekä 2020. Määrät ovat silti edelleen erittäin pieniä, kun vertaa esimerkiksi Suomen tavoitteeseen 250 000 sähköautosta vuonna 2030. Kysyntää siis voi olla vedyn laajamittaiselle käytölle liikenteessä tulevaisuudessa, mutta vielä sitä on kovin vähän.

Taulukko 10. Vetyautojen määrä 2014 ja tavoitteet vuosille 2015 ja 2020 (IEA 2015).

Maa/alue	Käytössä	2015	2020
Eurooppa	192	5000	350 000
Japani	102	1000	100 000
Etelä-Korea	100	5000	50 000
Yhdysvallat	146	300	20 000

3.2. Vedyn tuotanto

Dufour, Serrano et al. vertailivat (Dufour, Serrano et al. 2011) vaihtoehtoisia fossiilisia lähteitä vedyn tuotantoon. Vertailussa oli mukana maakaasu, etanoli, bensiini, diesel ja hiili. Kuva 24 kuvaa yleisellä tasolla hiilivedyn reformointireaktiota (ylempi) ja vesi-kaasu-vaihtoreaktiota (alempi). Ensimmäisessä vaiheessa hiilivedystä saadaan höyryn avulla hiilimonoksidia (CO) ja vetyä (H₂). Toisessa vaiheessa hiilimonoksidista saadaan lisää vetyä, mutta tässä reaktiossa syntyy myös hiilidioksidia (CO₂).



Kuva 24. Hiilivedyn reformointi ja vesi-kaasu-vaihtoreaktio.

Bensiinin, dieselin ja etanolin (saatu tässä tapauksessa öljynjalostuksesta saadusta etyleenistä) käyttö vedyn valmistukseen tuotti tässä tutkimuksessa suurimmat CO₂-päästöt. Pääosin tämä johtuu pitkien hiilivetyjen huonosta vety-hiili -suhteesta, joka vaikuttaa prosessin energiatehokkuuteen. Vaikka raakaöljyn jakeet eivät siis ole yhtä hyviä vedyn lähteitä kuin maakaasu tai hiili, niin niistä on mahdollista valmistaa vetyä. Tässä tapauksessa ei ole kuitenkaan optimoitu vedyn tuotantoa raakaöljystä, vaan on valmistettu vetyä erilleen tislatuista jakeista. Voisi olla mahdollista, että tuotantoprosessi jossa valmistettaisiin nimenomaan vetyä raakaöljystä, voisi olla tehokkaampi.

4. Johtopäätökset ja suositukset jatkotutkimukselle

Energian käyttö kaikilla sektoreilla tulee näkemään suuria muutoksia lähivuosina. Lokakuussa 2018 julkaistun IPCC:n ilmastoraportin (IPCC 2018) mukaan maailman CO₂-nettopäästöt pitäisi saada merkittävästi vähenemään jo vuodesta 2020 alkaen. Vielä on epäselvää, kuinka suuriin muutoksiin jo tehtyihin tavoitteisiin päästövähennysten suhteen tämä raportti johtaa. Lentoliikenne on ottanut tavoitteeksi päästöneutraalin kasvun vuodesta 2020 eteenpäin, mikä tarkoittaa liikennemäärien muutaman prosentin vuosikasvulla kohtalaisen reippaita päästöjen vähenemisiä valtaosin biokerosiinin käytöllä ja päästökaupalla. Biokerosiiniin valmistusmäärät ovat vielä pieniä, joten ainakin lähivuosina päästökaupan osuus tullee olemaan suuri.

Maailmassa on niukasti käyttämätöntä viljelysmaata, joka sopisi biokerosiinin raaka-aineiden tuotantoon. Väestönkasvu ja vaurastuminen pitävät huolen, että ruoan kysyntä kasvaa. EU:n alueella käyttämättä olevalle maalle, joka voisi soveltua energiakasvien viljelyyn voitaisiin kasvattaa raaka-ainetta täyttämään vain muutama prosentti EU:n lentoliikenteen polttoaineentarpeesta. Suomen tilanne on toinen, mutta täälläkin puusta on paljon kilpailua ainakin niin kauan kuin paperiteollisuus maassa viihtyy.

OECD-maissa kerosiinin osuus on ollut noin 10 prosenttia jalostustuotteista. Tämän osuuden merkittävä lisääminen voisi yksinään riittää vähentämään raakaöljyn kulutusta, mikäli bensiinin, dieselin ja muiden jakeiden kysyntä vähenee merkittävästi. Tästä aiheesta on tehty tähän mennessä niukasti tutkimusta, ja esimerkkinä käytetty Trainerin jalostamon tapaus osoittaa, että yritykset nostaa kerosiinin osuutta ovat haastavia. Mikäli biokerosiinin laajamittaiseen tuotantoon ei saada lähivuosina tarpeeksi raaka-aineita, jalostusprosessien muuttamista kerosiinipainotteisemmiksi tullaan luultavasti tutkimaan selkeästi aiempaa enemmän.

Bensiini ja diesel eivät ole vedyn valmistukseen optimaalisia raaka-aineita. Näistä on mahdollista valmistaa vetyä, mutta markkinataloudessa on vaikea nähdä valmistajien valitsevan näitä raaka-aineikseen ilman poliittista ohjausta. Näiden aineiden käytön tukeminen rahallisesti voisi muuttaa tilannetta niin, että ylijääneet jakeet saataisiin ohjattua vedyn tuotantoon ja siten estää niiden polttaminen hiilidioksidiksi. Tämä vaatii vahvaa poliittista tahtoa hallituksilta.

Lähteet

Alfke, G., Irion, W.W. & Neuwirth, O.S. 2000, "Oil Refining" in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Ali Shah, A., Hasan, F., Shah, Z., Kanwal, N. and Zeb, S., 2013. Biodegradation of natural and synthetic rubbers: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **83**, pp. 145-157.

Allen, B., Kretschmer, B., Baldock, D., Menadue, H., Nanni, S. & Tucker, G. 2014, *Space for energy crops - assessing the potential contribution to Europe's energy future*, Institute for European Environmental Policy.

Altin, O. & Eser, S. 2004, "Carbon Deposit Formation From Thermal Stressing of Petroleum Fuels", Preprints of Papers- American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, vol. 49, no. 2, pp. 764-766.

Arup URS consortium 2014, *Advanced biofuel feedstocks - an assessment of sustainability*, Department for Transport.

Asphalt Institute Inc. & European Bitumen Association-Eurobitume 2015, *The bitumen industry - a global perspective. Production, chemistry, use, specification and occupational exposure*, 3rd ed.

Aziz, M.M.A., Rahman, M.T., Hainin, M.R. & Bakar, W.A.W.A. 2015, "An overview on alternative binders for flexible pavement", *Construction and Building Materials*, vol. 84, pp. 315-319.

Bishop, G.J. 2011, "Aviation Turbine Fuels" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Davis, R., Tao, L., Scarlata, C., Tan, E.C.D., Ross, J., Lukas, J. & Sexton, D. 2015, *Process Design and Economics for the Conversion of Lignocellulosic Biomass to Hydrocarbons: Dilute-Acid and Enzymatic Deconstruction of Biomass to Sugars and Catalytic Conversion of Sugars to Hydrocarbons*, National Renewable Energy Laboratory.

de Jong, S., Antonissen, K., Hoefnagels, R., Lonza, L., Wang, M., Faaij, A. & Junginger, M. 2017, "Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production", *Biotechnology for Biofuels*, vol. 10, no. 1, pp. 64.

Delta Air Lines, 2012-last update, *Delta to Acquire Trainer Refinery: Addressing Rising Jet Fuel Risk - a regulatory filing to SEC* [Homepage of SEC], [Online]. Available: https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/27904/000101968712001529/delta_8k-ex9902.htm [8/22, 2018].

Dufour, J., Serrano, D.P., Gálvez, J.L., Moreno, J. and González, A., 2011. Hydrogen Production from Fossil Fuels: Life Cycle Assessment of Technologies with Low Greenhouse Gas Emissions. *Energy Fuels*, **25**(5), pp. 2194-2202.

EIA 2018, 2/28-last update, *Refinery yields by area*. Available: https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pnp_pct_a_EPJK_YRY_pct_a.htm [2018, 3/29].

EIA, 2012-last update, *Delta Air Lines plans to increase jet fuel yield at Trainer refinery* [Homepage of EIA], [Online]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=6650> [8/22, 2018].

European Bioplastics 2017, *Bioplastics market data 2017 - global production capacities of bioplastics 2017 - 2022*, European Bioplastics.

European Commission, European Advanced Biofuels Flightpath [Homepage of European Commission], [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/biofuels/biofuels-aviation> [2018, 2.2.].

European Environment Agency 2006, *How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?*, EEA.

E4tech, 2016. *Hydrogen and Fuel Cells: Opportunities for Growth - a Roadmap for the UK*.

Fahim, M.A., Alsahhaf, T.A. & Elkilani, A.S. 2010, *Fundamentals of petroleum refining*, Elsevier, Amsterdam.

FlightGlobal, 2013-last update, *Jet fuel yields well below targets at Delta refinery*. Available: <https://www.flightglobal.com/news/articles/jet-fuel-yields-well-below-targets-at-delta-refinery-385970/> [8/22, 2018].

FNR 2014, *BIOPLASTICS - plants and crops, raw materials, products*, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

FuelsEurope 2017, *Statistical report 2017*.

Guo, R., Peng, C., Fang, X., Zeng, R., Wu, Z. & Sun, H. 2017, *Method for producing jet fuel by hydrocracking of straight-run diesel fuel*, China Petroleum & Chemical Corp., Peop. Rep. China; Fushun Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Sinopec.

Hemighaus, G.&a. 2007, *Aviation Fuels Technical Review*, Chevron Products Company.

HS 2017, *Meri ei saa olla kaatopaikka (pääkirjoitus 29.4.2017)*, Helsingin Sanomat, Helsinki.

HS 2018a, *Muovin korvaaminen avaa suomalaisille mahdollisuuden (pääkirjoitus 30.5.2018)*, Helsingin Sanomat, Helsinki.

HS 2018b, *Tanska aikoo kieltää bensa- ja dieselautojen myynnin vuonna 2030 (uutinen 2.10.2018)*, Helsingin Sanomat, Helsinki.

Huttunen, R. 2017, *Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030*, Työ- ja elinkeinoministeriö.

IATA 2015, *IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap*, IATA.

IATA 2018a, *Air passenger market analysis January 2018*, IATA.

IATA 2018b, *Fact sheet on CORSIA*.

ICAO 2016, *Resolution adopted by the assembly – 39th edition*.

ICAO 2017b, *Trends and scenarios on alternative fuels - working paper*.

ICAO 2017a, *Use of aviation alternative fuels for international aviation - working paper*.

IEA 2018, *Monthly oil statistics - october 2017*.

IEA 2017, 7/11-last update, *World Energy Investment 2017* [Homepage of IEA], [Online]. Available: <https://www.iea.org/publications/wei2017/> [2018, 3/23].

IEA, 2015. *Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells*.

IL 2018, *Muovinen elämä on vaarallista (pääkirjoitus 4.2.2018)*, Iltalehti.

IPCC, 2018. *Global Warming of 1.5°C - summary for policymakers*.

IPCC 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Intergovernmental Panel on Climate Change.

Leffler, W.L. 2008, *Petroleum refining in nontechnical language*, 4th ed edn, PennWell, Tulsa, Okla.

Liikenne- ja viestintäministeriö 2014, "Selvitys lentoliikenteen biopolttoaineiden käyttöönotosta Suomessa", Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja, no. 34.

Liikenne- ja viestintäministeriö 2013, "Tulevaisuuden käyttövoimat liikenteessä. Työryhmän loppuraportti", Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja, vol. 15.

Liu, G., 2013. Technical review on jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **25**, pp. 59-70.

Luonnonvarakeskus, 10.9., 2018-last update, Valtakunnan metsien 12. inventointi (VMI12). Available: <https://www.luke.fi/uutiset/valtakunnan-metsien-12-inventointi-vmi12-puuvarat-kasvavat-edelleen/> [11.15., 2018].

Marker, T.L., Petri, J.A., Luebke, C.P., Kalnes, T.N. and McCall, M.J., 2014. *Use of n-paraffin adsorption to increase selectivity and yield of synthetic distillate fuel*. UOP LLC, USA.

OPEC 2018, World Oil Outlook 2017, Organization of the Petroleum Exporting Countries.

OPEC 2016, "Annual Statistical Bulletin 2016", pp. 22.

Peng, C., Cao, Z., Du, Y., Zeng, R., Guo, R., Duan, X. and Fang, X., 2018. Optimization of a Pilot Hydrocracking Unit To Improve the Yield and Quality of Jet Fuel Together with Heavy Naphtha and Tail Oil. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **57**(6), pp. 2068-2074.

Plastics Europe 2018, *Plastics - the Facts 2017 - an analysis of European plastics production, demand and waste data*, Plastics Europe.

Pöyry Management Consulting, 2017. *Metsäbiomassan kustannustehokas käyttö*. Valtioneuvoston kanslia.

Simola, H. & Solanko, L. 2017, *Katsaus Venäjän öljy- ja kaasusektoriin*, Suomen Pankki, BOFIT - Siirtymätalouksien tutkimuslaitos.

Staples, M.D., Malina, R., Olcay, H., Pearlson, M.N., Hileman, J.I., Boies, A. & Barrett, S.R.H. 2014, "Lifecycle greenhouse gas footprint and minimum selling price of renewable diesel and jet fuel from fermentation and advanced fermentation production technologies", *Energy & Environmental Science*, vol. 7, no. 5, pp. 1545-1554.

statista 2018a, *Global plastic production from 1950 to 2016*. Available: <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/> [2018, 6/13].

statista 2018a, *Synthetic rubber production worldwide* [Homepage of statista], [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/280536/global-natural-rubber-production/> [2018, 6/15].

Trafi 2016a, State Action Plan of Finland - International Aviation CO2 Emissions, Liikenteen turvallisuusvirasto (Trafi).

Trafi 2016b, Tiedote CORSIAsta

U.S. Department of Energy 2017, U.S. Energy and Employment Report - January 2017, United States Department of Energy.

United Nations 2017, *World Population Prospects 2017* [Homepage of UN], [Online]. Available: <https://esa.un.org/unpd/wpp/DataQuery/> [2018, 4/19].

USDA 2017, *USDA GAIN report - Brazil Biofuels Annual*, United States Department of Agriculture.

Vignesh, H., Ramesh, B.N.G., Manivasagan, V., Suganya, S. and Eajas, B.M., 2013. Emerging Trends in Greener Pavements. *International Journal of Engineering Research*, **2**(2),.

Wang, W., Tao, L., Markham, J., Zhang, Y., Tan, E., Batan, L., Warner, E. & Biddy, M. 2016, *Review of Biojet Fuel Conversion Technologies*, National Renewable Energy Laboratory, United States.

Wikipedia, *energy densities ignoring external components*. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density#Energy_densities_ignoring_external_components [2018, 7/12].

World Bank a, Air transport, passengers carried source: ICAO, ICAO staff estimates, Civil Aviation Statistics of the World [Homepage of World Bank], [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR> [2018, 3/21].

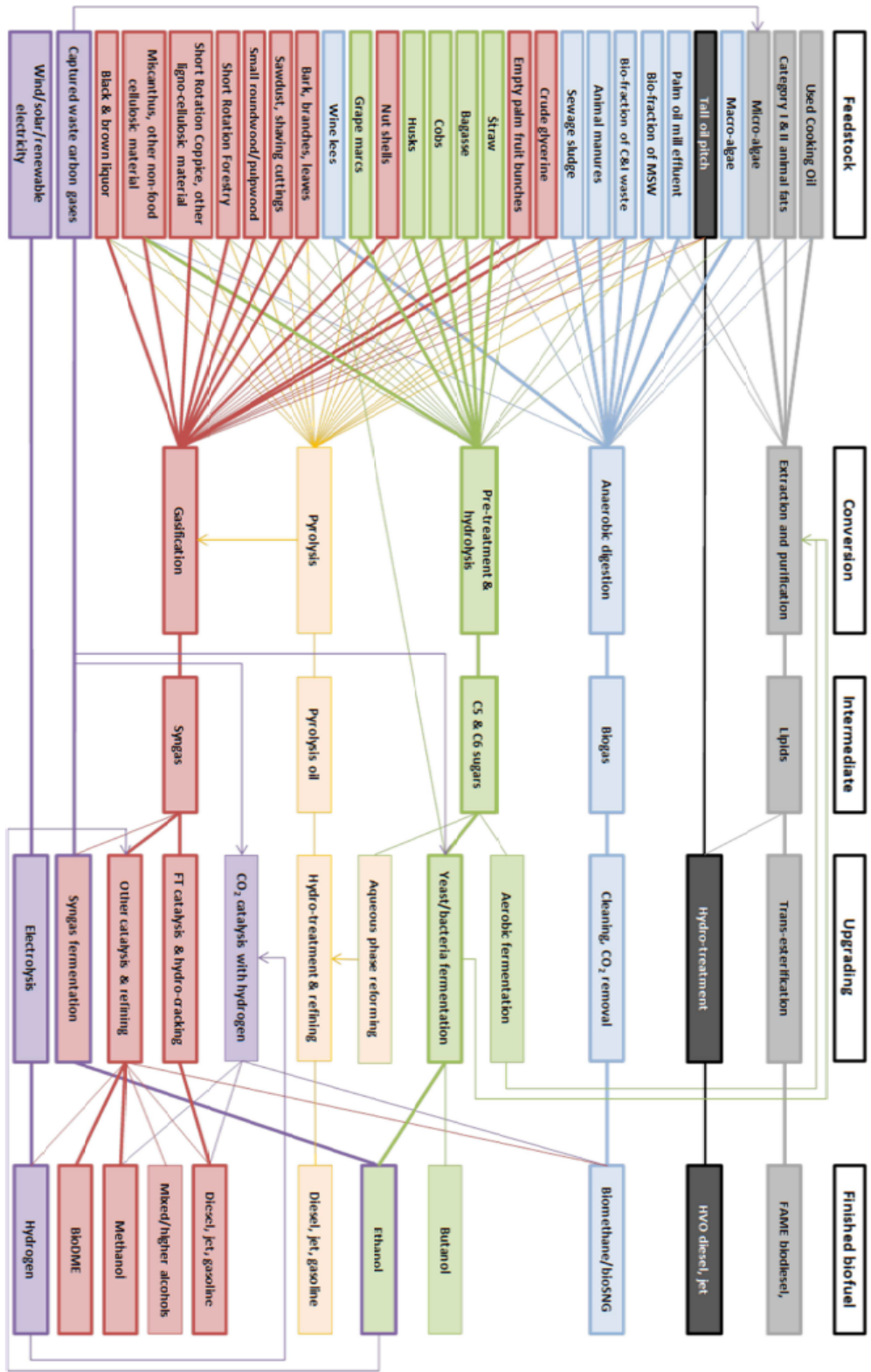
World Bank b, b-last update, World agricultural land. Available: https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2?name_desc=false [6/14, 2018].

Ympäristöministeriö 2017, "Valtioneuvoston selonteko keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmasta vuoteen 2030 - Kohti ilmastoviisasta arkea", Ympäristöministeriön raportteja, vol. 21.

Zhang, Z., Zhang, W., Zhang, Y., Ji, D., Jin, H., Wang, G. and Zhang, Z., 2017. Technical review on flexible processing middle distillate for achieving maximum profit in China. *Applied Petrochemical Research*, **7**(2), pp. 67-77.

Zhao, B., Wang, Z., Liu, Z. and Yang, X., 2016. Two-stage upgrading of hydrothermal algae biocrude to kerosene-range biofuel. *Green Chemistry*, **18**(19), pp. 5254-5265.

Zhou, H., Lu, J., Cao, Z., Shi, J., Pan, M., Li, W. & Jiang, Q. 2011, "Modeling and optimization of an industrial hydrocracking unit to improve the yield of diesel or kerosene", *Fuel*, vol. 90, no. 12, pp. 3521-3530.



E_5 in Eqs. (1), (2), and (5)). The tuning of the 10 parameters is based on the minimization of the root of sum of the squared error between the model predictions and the measured values in the plant. The overall objective consisted of the minimization of the root of sum of the squared error in product yields, the nitrogen content, and the exit temperature from the six beds. The expression of the objective is

$$obj = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \sigma_i \left(1 - \frac{y_{i,C}}{y_{i,F}}\right)^2 + \sum_{h=1}^6 \sigma_h \left(1 - \frac{T_{out,h,C}}{T_{out,h,F}}\right)^2 + \left(1 - \frac{W_{out,N,C}}{W_{out,N,F}}\right)^2}$$

The kinetic model of the hydrocracking process is similar to that in Stangeland's [7]; the detail expression is as the following:

$$r_i = \begin{cases} -k_i w_i + \sum_{j=i}^n P_{ij} k_j w_j & i \geq 5 \\ -k_i w_i + \sum_{j=6}^n P_{ij} k_j w_j & i < 5 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

For mixtures of compounds, there is an additional effect of adsorption on relative reaction rates. In general, heavier hydrocarbons adsorb more strongly and react faster than that are lighter. Also, normal paraffins of a given molecular weight crack more slowly than the corresponding isoparaffins or cyclic compounds [7]. Thus, k_i will be dependent on the feed composition and catalyst character. An expression for k_i is needed that could reflect the differences with a minimum number of parameters. After several attempted expressions, the following function can be chosen. In order to simplify the model, some parameters are introduced to correlate k_i and P_{ij} similar to those of Stangeland's [7].

$$k_i = 0, \quad TBP_i \leq 130^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$k_i = k_0 \left(T_i + aT_i^3 - aT_i \right) \exp \left(\frac{E}{RT_i} \right), \quad TBP_i > 130^\circ\text{C} \quad (5)$$

where $T_i = \frac{1.8TBP_i + 32}{1000}$. The product distribution during hydrocracking of each component is evaluated based on the correlations in literature [1]. The mass fraction of butanes and lighter components formed from hydrocracking of j th component (with boiling point, TBP_j in $^\circ\text{C}$) is given by

$$P_{1j} = c \exp[-\omega(1.8TBP_j - 229.5)] \quad (6)$$

where C and ω are constants. The yield of all other fractions having higher boiling points than that of butane are evaluated as follows:

$$P'_{ij} = (y_{ij}^2 + by_{ij}^3 - by_{ij}^2)(1 - P_{1j}) \quad (7)$$

$$y_{ij} = \frac{TBP_i - 2.5}{TBP_j - 52.5} \quad \text{for } i = 2 \text{ to } j-2, j = 6 \text{ to } N \quad (8)$$

$$P_{ij} = P'_{ij} - P'_{i-1,j} \quad (9)$$

Table 10
Results of the optimization for kerosene.

	Industrial measured	Optimal value of GA	Optimal value of SQP
H ₂ flow rate between 1th and 2th bed (Nm ³ h ⁻¹)	15,141	10,585	11,204
H ₂ flow rate between 2th and 3th bed (Nm ³ h ⁻¹)	28,913	29,366	33,846
H ₂ flow rate between 3th and 4th bed (Nm ³ h ⁻¹)	15,538	15,933	11,342
H ₂ flow rate between 4th and 5th bed (Nm ³ h ⁻¹)	18,808	16,838	11,191
H ₂ flow rate between 5th and 6th bed (Nm ³ h ⁻¹)	14,273	10,435	11,204
Outlet temperature of 1th bed (K)	660.82	660.39	660.39
Outlet temperature of 2th bed (K)	665.82	666.69	666.36
Outlet temperature of 3th bed (K)	652.67	653.58	649.81
Outlet temperature of 4th bed (K)	652.01	653.64	651.31
Outlet temperature of 5th bed (K)	652.65	654.53	653.73
Outlet temperature of 6th bed (K)	653.72	656.94	656.69
Sulfur content of the Outlet in HT (µg g ⁻¹)	7.01	4.98	5.14
Single-pass conversion ratio (%)	67.48	69.99	68.89
Yield of kerosene (%)	20.05	21.01	21.14
Computational time (s)	-	232.61	40.41

LIITE 4

	United States	United Kingdom	International	Russia ^a	China ^b
Specification	ASTM D1655	DEF STAN 91-91	Checklist	GOST 10227-86	GB 6537-94
Issue	96b	2	16	Amendment 4	effective June 95
Date	Jul. 96	May 96	Jun. 96	Apr. 96	Aug. 94
Grade	Jet A-1	Jet A-1	Jet A-1	TS-1	No.3 Jet Fuel
Composition					
Acidity, total, mg KOH/g (max)	0.10	0.015	0.015	0.009 ^c	0.015
Aromatics, vol % (max)	25 ^e	22.0 ^d	22.0 ^d	22 mass %	20.0
Olefins, vol % (max)	NR	NR ^e	NR ^e	iodine no.2.5 max	5.0
Sulfur, total, mass % (max)	0.30	0.30	0.30	0.25	0.20
Sulfur, mercaptan (thiol), mass % (max)	0.003	0.003	0.003	0.005	0.002
or					
Doctor test	negative	negative	negative	NR	negative
Volatility					
Distillation:					
Initial boiling point (IBP), °C (max)	NR ^e	report	report	150	report
10 % vol recovered at, °C (max)	205	205	205	165	205
20 % vol recovered at, °C (max)	NR ^e	NR ^e	report	NR ^e	report
50 % vol recovered at, °C (max)	report	report	report	195	232
90 % vol recovered at, °C (max)	report	report	report	230	report
Final boiling point (FBP), °C (max)	300	300	300	98 % (250 °C)	300
Residue, vol % (max)	1.5	1.5	1.5	NR ^e	1.5
Loss, vol % (max)	1.5	1.5	1.5	NR ^e	1.5
Flash point ^f , °C (min)	38	40 (38)	40 (38)	33 (28)	38
Density at 15 °C, kg/m ³	775 – 840	775 – 840	775 – 840	775 (min) (20 °C)	775 – 830 (20 °C)
Fluidity					
Freezing point, °C (max)	– 47	– 47	– 47	– 50 ^g	– 47
Viscosity at 20 °C, mm ² /s (min)	NR	NR	NR	1.25	1.25
Viscosity at – 20 °C, mm ² /s (max)	8.0	8.0	8.0	8 (– 40 °C)	8.0
Combustion					
Specific energy (net), MJ/kg (min)	42.8	42.8	42.8	42.9	42.8
Smoke point, mm (min)	25	25	25	25	25
or					
Smoke point, mm (min)	18	19	19	NR ^e	20
and naphthalenes, vol % (max)	3.0	3.0	3.0	NR ^e	3.0
or					
Luminometer no. (min)	45	45	45	NR ^e	45
Corrosion					
Copper corrosion (max)	1	1	1	passes	1
Silver corrosion (max)	NR ^e	2 ^h	2	NR ^e	1
Stability					
Thermal stability:				not comparable	
JFTOT test temp., °C	260	260	260	260	
Filter pressure drop, mm Hg (max)	25	25	25	3.3 kPa	
Tube deposit (visual) rating	LT 3	LT 3	LT 3	LT 3	
Peacock/abnormal deposits	fail	fail	fail	fail	
Contaminants					
Copper content ⁱ (max)	NR ^e	NR ^e	NR ^e	NR ^e	150 µg/kg
Existent gum, mg/100mL (max)	7	7	7	5	7
Water reaction					
Interface rating (max)	1b	1b	1b	1	1b
Separation rating	NR ^e	NR ^e	NR	NR	report
Microseparometer (MSEP) (min)	NR ^e	85 (+ SDA = 70)	85 (+ SDA = 70)	NR	NR ^e
Particulates, mg/L (max)	NR ^e	NR ^e	NR ^e	none	report
Ash content, mass % (max)	NR ^e	NR ^e	NR ^e	0.003	NR ^e
Electrical conductivity ^k , pS/m	50 – 450	50 – 450	50 – 450	50 – 600	50 – 450 (20 °C)
Additives					
Antioxidant (hydroprocessed fuels)	optional	mandatory	mandatory	mandatory	optional
Antioxidant (other fuels)	optional	optional	optional	optional	optional
Metal deactivator	optional	optional	optional	NR ^e	NR ^e
Static dissipator	optional	mandatory	mandatory	optional	optional
Fuel system icing inhibitor	permitted	permitted	permitted	permitted	permitted
Lubricity improver	permitted	permitted	permitted	mandatory in HP	permitted